



Aide aux choix de conception de bâtiments économes en énergie

Maxime Trocmé

► To cite this version:

Maxime Trocmé. Aide aux choix de conception de bâtiments économes en énergie. Sciences de l'ingénieur [physics]. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2009. Français. NNT : 2009ENMP1674 . pastel-00005892

HAL Id: pastel-00005892

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00005892>

Submitted on 17 Mar 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ED n°432 : « Sciences des Métiers de l'Ingénieur »

T H E S E

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE PARIS

Spécialité “énergétique”

présentée et soutenue publiquement par

Maxime TROCMÉ

le 26 novembre 2009

Aide aux choix de conception de bâtiments économes en énergie
--

Directeur de thèse : Bruno Peuportier

Jury

M. Denis Clodic
M. Rachid Bennacer
M. Patrice Joubert
M. Christophe Gobin
M. Laurent Mora
M. Bruno Peuportier

Président du jury
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur

AIDE AUX CHOIX DE CONCEPTION DE BATIMENTS ECONOMES EN ENERGIE

Résumé

Dans un contexte de raréfaction des ressources énergétiques et d'objectifs de diminution par 4 des émissions de gaz à effet de serre, le problème posé aux acteurs de l'industrie du bâtiment est d'élaborer des concepts de bâtiments à forte efficacité énergétique et de disposer des outils d'ingénierie capables de les évaluer. De nombreuses études et retours d'expériences sur des bâtiments atteignant des besoins annuels de chauffage inférieurs à 50 kWh.m⁻² (incluant chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire, éclairage et ventilation) montrent que la diminution des consommations énergétiques passe par une conception architecturale prenant en compte la compacité du bâtiment et la gestion des apports d'énergie passifs, une sur-isolation de l'enveloppe, la mise en place de free-cooling et d'une ventilation double-flux avec récupération de chaleur. Les performances de cette dernière technologie sont directement affectées par le renouvellement d'air naturel à travers les défauts d'étanchéité de l'enveloppe. Il paraît donc primordial de procéder à une évaluation plus fine de ces phénomènes. Un modèle de simulation aéraulique multizone est développé. Il permet d'évaluer les débits d'air dans le bâtiment et s'insère dans un outil d'aide à la conception thermique, COMFIE. Ce modèle est basé sur les hypothèses du mélange parfait et de la conservation de la masse pour chaque zone du bâtiment. Les débits d'air entre deux zones s'expriment en fonction de la différence de pression (causée par le vent et le tirage thermique) entre ces zones. Plusieurs sortes de connexions aérauliques sont implémentées dont les fissures, les entrées d'air et les grandes ouvertures. Le modèle aéraulique utilise les températures du modèle thermique pour qui les débits d'air sont aussi une donnée d'entrée. Les deux modèles sont donc couplés, via une méthode synchrone, jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit atteint. Deux études de cas permettent de présenter les fonctionnalités du modèles : une opération de logement et un "concept building" de bâtiment urbain performant.

Mots clés : Simulation thermique, simulation aéraulique, multizone, étanchéité à l'air, besoins de chauffage.

ASSISTING LOW ENERGY CONSUMPTION BUILDING DESIGN

Abstract

In order to respond to global warming and natural resources depletion challenges, industrials from the building sector need to propose an adequate offer. Energy simulation tools can support this process. Various studies and real cases show that a high performance level, e.g. primary energy consumption below 50 kWh.m⁻² per year (including heating, cooling, domestic hot water, lighting and ventilation), can be reached by appropriate architecture combined with high insulation, free cooling and heat recovery on exhaust air. This last technology is particularly affected by airflows across the building envelope caused by a low air tightness. Thermal modelling tools need therefore to deal with this issue precisely. A multizone model has been developed to compute building airflows in order to evaluate them with a higher degree of precision in the frame of a simplified simulation tool that can be used in early design phases. This model is based on the well-mixed zones assumption and mass conservation principles. The air flow rate between two zones is expressed as a function of the pressure drop between those two zones. Wind pressure and buoyancy effects are the causes of pressure drops. Several types of connections are implemented: cracks, ventilation inlets, large openings. This model has been implemented in the thermal building simulation tool COMFIE. The airflow model uses the zone temperatures as an input and reciprocally the thermal model requires the airflows. Both models run therefore at each time step until convergence is reached using a synchronous coupling method. Two case studies are presented. First, the case of a residential building, project of Vinci Construction France where the influence of air tightness on heating loads is being studied. Then the case of a concept building, Effibat, being developed by Vinci Construction France and MINES ParisTech. This building is an urban dwelling building including an atrium. Natural ventilation is used to cool the building at night in summer and the model aims at evaluating the resulting comfort level.

Key words : Thermal simulation, airflow simulation, multizone, air tightness, heating loads.

Laboratoire d'accueil : Centre Energétique et Procédés (CEP) - Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris

Paris : 60 Bd Saint-Michel - F-75272 Paris Cedex 06

Thèse présentée par : TROCME Maxime **le :** 26 novembre 2009

Ecole Doctorale : N° 432 : « Sciences des Métiers de l'Ingénieur »

Discipline : « Energétique » - Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche s'est déroulé dans le cadre d'une convention CIFRE entre Vinci Construction France et MINES ParisTech. Il s'est déroulé à Nanterre, à la D.R.D. (Direction des Ressources techniques et du Développement durable) de Vinci Construction France.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont permis de réaliser ce travail, en particuliers :

Bruno Peuportier, directeur de thèse, maître de recherche à MINES ParisTech, qui m'a fait confiance et proposé ce sujet de thèse. Pendant ces trois années, il a été disponible, et ses nombreux conseils avisés. Travailler à ses côtés s'est avéré enrichissant, tant d'un point de vu professionnel qu'humain.

Louis Demilecamps, responsable de la D.R.D. de Vinci Construction France, qui m'a accueilli dans son service. Je le remercie pour son intérêt et son suivi régulier de mes travaux.

Christophe Gobin, responsable du service Recherche & Développement de Vinci Construction France, qui, tout en encadrant mes travaux de recherche, m'a permis d'appliquer les outils développés dans le cadre d'opérations réelles et aux côtés duquel j'ai beaucoup appris sur le monde de l'entreprise.

Rachid Bennacer, professeur à l'université de Cergy, qui a accepté d'être rapporteur de cette thèse, pour ses conseils, son suivi et ses encouragements.

Patrice Joubert, maître de conférence à l'université de La Rochelle, qui a montré un intérêt pour mon travail et accepté d'être rapporteur de cette thèse.

Denis Clodic, directeur adjoint du CEP, directeur de recherche à MINES ParisTech, qui a accepté d'être membre du jury de cette thèse dont il a régulièrement suivi l'évolution.

Laurent Mora, maître de conférences à l'université de Bordeaux, qui a accepté d'être membre du jury de cette thèse pour ses nombreux conseils sur la modélisation aérodynamique des bâtiments.

Au CEP : Anne-Marie Pougin et Aline Garnier pour leur grand soutien administratif "à distance". Pascal Stabat pour m'avoir initié à TRNSYS. Toute l'équipe du thème de recherche "cycle de vie des bâtiments" (d'hier et d'aujourd'hui) : Emil Popovici, Stéphane Thiers, Mohamed El Mtiri, Bruno Filliard, Alain Guiavarch, Grégory Herfray...

A la D.R.D. : Fatima Berrahou et Pascale Hamani pour leur grand soutien administratif "de proximité"; le service documentation (en particulier Marie-Odile Mandin); ceux avec qui j'ai eu l'occasion de travailler sur la thématique de l'énergétique des bâtiments : Julien Legoux, Nathalie Méhu, Benjamin Cazalet, Claude Claveaux, Bruno Marconato, et les opérationnels des différentes filiales; ceux avec qui j'ai aimé partagé bureau, couloir ou conversation : Lina Bawji, Mélissa Beka, Ludovic Boucaux, Pauline Boudoux d'Hautefeuille, Nicolas Chevance, Marylise Dupraz, Zahra El Krymy Ali Labsita, Nicolas Legrand, Sophie Lelièvre, Bénédicte Marminat, Romain Piquet, Julien Semenadisse et les autres; les stagiaires que j'ai eu l'occasion de cotoyer, en particulier Caroline, Pierre & Etienne, Bruce, Yann, Olivier; Audrey Hénaff qui parlait vraiment bien allemand.

Les amis : l'équipe de la comédie, les copains du cardinal et les deux gabonais qui, même si "ils sont bêtes", savent que le menuisier n'a que trois outils; Patoche, l'aiguilleur de la 7; GTOM5, le nit; Jacky, le chasseur d'images du mois d'août; le sculpteur du stand 91; les membres de l'association D.A.S.R.P....

Je tiens enfin à remercier mes parents pour leur investissement permanent pendant toute ma scolarité, ma sœur géologue en herbe et, bien sûr, Jeanne-Charlotte qui m'a épaulé, soutenu et supporté pendant ces trois ans.

SOMMAIRE

SOMMAIRE	7
CHAPITRE I : INTRODUCTION	11
I-1) CONTEXTE	12
I-2) EXPOSÉ DU PROBLÈME	12
I-2-1) PROBLÉMATIQUES DE CONCEPTION	12
I-2-2) OUTILS DISPONIBLES	14
I-3) OBJECTIFS DE LA THÈSE, ORIGINALITÉ	15
I-4) DÉMARCHE	15
CHAPITRE II : MODÉLISATION DES TRANSFERTS AÉRAULIQUES DANS LES BÂTIMENTS ...	17
II-1) MODÈLES MONO-ZONE	18
II-1-1) ESTIMATION À PARTIR DE LA PERMÉABILITÉ À L' AIR DU BÂTIMENT	18
II-1-2) MODÈLES THÉORIQUES SIMPLIFIÉS	20
II-1-3) MODÈLES MONO-ZONE DÉTAILLÉS	22
II-2) MODÈLES MULTI-ZONE	26
II-2-1) PRINCIPE	26
II-2-2) PRISE EN COMPTE DES PHÉNOMÈNES PHYSIQUES AUX ORIGINES DES TRANSFERTS AÉRAULIQUES	27
II-2-2-1) RELATION DE BERNOULLI	27
II-2-2-2) TIRAGE THERMIQUE	28
II-2-2-3) EFFETS DU VENT	30
II-2-3) MODÈLES DE CONNEXIONS AÉRAULIQUES	38
II-2-3-1) MODÈLES DE FISSURE	38
III-2-3-2) MODÈLES DE GRANDE OUVERTURE	40
II-4) L' APPROCHE ZONALE	45
II-4-1) STRUCTURE GÉNÉRALE DU MODÈLE	46
II-4-2) CELLULES COURANTES	47
II-4-3) CELLULES À ÉCOULEMENT SPÉCIFIQUE	48
II-4-3-1) MODÈLE DE JET DE PAROI	48
II-4-3-2) MODÈLE DE PANACHE DE CHALEUR	49
II-4-4) DESCRIPTION DE L' ENVELOPPE	50
II-5) LES CFD	51
II-6) CONCLUSION	52
CHAPITRE III : MODÈLE AÉRAULIQUE : DÉVELOPPEMENT ET COUPLAGE AVEC UN OUTIL DE SIMULATION THERMIQUE	53
III-1) SÉLECTION D' UN MODELE	54
III-1-1) CHOIX DES PRINCIPES GÉNÉRAUX	54
III-1-2) CHOIX SPÉCIFIQUES	56
III-1-2-1) DÉFAUTS D'ÉTANCHÉITÉ DE L' ENVELOPPE	56
III-1-2-2) RÉALISATION VIRTUELLE D' UN TEST DE PORTE SOUFFLANTE	58
III-1-2-3) MÉTHODE POUR LA DISTRIBUTION DES INFILTRATIONS EN FONCTION D' UNE MESURE	60
III-1-2-4) ENTRÉES D' AIR	61
III-1-2-5) VENTILATION MÉCANIQUE	62

III-1-2-6) GRANDES OUVERTURES	62
III-1-2-7) DÉROULEMENT DES CALCULS	64
III-1-3) LE MODÈLE THERMIQUE	67
III-1-3-1) LE MODÈLE D'ENVELOPPE DU BÂTIMENT	67
III-1-3-2) ECHANGES THERMIQUES DUS A LA VENTILATION.....	69
III-1-4) COUPLAGE MOUVEMENTS D'AIR / THERMIQUE	70
III-1-4-1) APPROCHES EXISTANTES	70
III-1-4-2) APPROCHE RETENUE.....	72
III-2) AMÉLIORATION D'UN OUTIL D'AIDE A LA CONCEPTION ET MISE EN ŒUVRE INFORMATIQUE	74
III-2-1) STRUCTURATION DES DONNÉES DANS COMFIE	74
III-2-2) ORGANISATION DU COMPO2.....	75
III-2-2-1) STRUCTURATION DES DONNÉES	75
III-2-2-1) CALCUL DES DÉBITS DE VENTILATION.....	76
III-2-3) MÉTHODOLOGIE POUR LE CHAINAGE MOUVEMENTS D'AIR / BATIMENT.....	77
III-2-4) ATTENTIONS PARTICULIERES A LA RESOLUTION NUMÉRIQUE	78
III-2-4-1) INITIALISATION	78
III-2-4-2) FAIBLES DIFFÉRENCE DE PRESSION.....	79
III-2-5) INTERFACE	79
III-3) ÉLÉMENTS DE VALIDATION.....	80
III-3-1) COMPARAISON A DES SOLUTIONS ANALYTIQUES	80
III-3-1-1) CONFIGURATION DE WALTON	80
III-3-1-2) CONFIGURATIONS "MONO"	81
III-3-2) COMPARAISON INTER-LOGICIELS.....	83
III-3-3) COMPARAISON AVEC TRNFLOW	85
III-4) CONCLUSION	91
CHAPITRE IV : DE LA CONCEPTION ÉNERGÉTIQUE À L'ÉCO-CONCEPTION : CHAINAGE ENTRE SIMULATION THERMIQUE ET ACV	93
IV-1) EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX D'UN BATIMENT PAR LA MÉTHODE D'ANALYSE DE CYCLE DE VIE : MÉTHODOLOGIE	94
IV-1-1) ANALYSE DE CYCLE DE VIE.....	94
IV-1-2) MODÉLISATION D'UN BÂTIMENT.....	97
IV-1-3) LE LOGICIEL EQUER	99
IV-1-4) INDICATEURS CONSIDÉRÉS.....	100
IV-2) IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX LIÉS À L'ÉTANCHÉITÉ.....	103
IV-2-1) JOINTS	103
IV-2-2) MOUSSES (POLYURÉTHANNE ET POLYÉTHYLENE).....	104
IV-2-3) BANDES	105
IV-2-4) ENDUITS	106
IV-3) CONCLUSION	106
CHAPITRE V : APPLICATIONS.....	107
V-1) EFFIBAT.....	108
V-1-1) PRÉSENTATION DU PROJET	108
V-1-1-1) PARTI ARCHITECTURAL	108
V-1-1-1) OBJECTIF DE PERFORMANCE ENERGETIQUE	108
V-1-2) HYPOTHÈSES THERMIQUES	110
V-1-2-1) GÉOMÉTRIE DU BÂTIMENT.....	110

V-1-2-2) COMPOSITION DES PAROIS ET MENUISERIES	110
V-1-2-3) FONCTIONNEMENT DU BÂTIMENT	111
V-1-2-4) DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES	112
V-1-3) HYPOTHÈSES AÉRAULIQUES	113
V-1-3-1) HIVER.....	113
V-1-3-2) ETÉ.....	114
V-1-3-3) VITESSE DE VENT AU SITE	115
V-1-3-4) REMARQUE SUR L’EVALUATION DES CONDITIONS AU SITE.....	117
V-1-4) RÉSULTATS	117
V-1-4-1) BESOINS DE CHAUFFAGE.....	117
V-1-4-2) CONFORT D’ETE.....	120
V-1-5) CONCLUSION	124
V-2) ETUDE ÉNERGÉTIQUE ET ENVIRONNEMENTALE D’UN PROJET DE LOGEMENTS EN BELGIQUE	125
V-2-1) PRÉSENTATION DU PROJET	125
V-2-2) ETUDE THERMIQUE	125
V-2-2-1) GÉOMÉTRIE DU BÂTIMENT	125
V-2-2-2) COMPOSITION DES PAROIS ET MENUISERIES	126
V-2-2-3) FONCTIONNEMENT DU BÂTIMENT	126
V-2-2-4) DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES	126
V-2-2-5) HYPOTHÈSES SUR LE RENOUVELLEMENT D’AIR	129
V-2-2-6) RÉSULTATS.....	129
V-2-3) ANALYSE DE CYCLE DE VIE	131
V-2-3-1) HYPOTHÈSES	131
V-2-3-2) RÉSULTATS.....	132
V-3) CONCLUSIONS	136
CHAPITRE VI : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	137
VI-1) CONCLUSIONS.....	138
VI-2) PERSPECTIVES.....	138
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	141

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Dans ce chapitre introductif sont présentés le contexte dans lequel s'inscrit la thèse et les objectifs auxquels le travail doit répondre. La démarche scientifique retenue est enfin développée.

I-1) CONTEXTE

Dans le but de limiter l'élévation globale des températures à moins de deux degrés, la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique [NATIONS UNIES, 1992] fixe l'objectif de stabiliser la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Pour arriver à un tel objectif, les émissions mondiales doivent être divisées par 2 d'ici 2050. Pour atteindre cet objectif moyen, les pays industrialisés doivent au moins diviser par 4 leurs émissions, objectif retenu par la France via la loi de Programme fixant les Orientations de la Politique Énergétique du 13 juillet 2005 [POPE, 2005]. A ce problème viennent également s'ajouter d'autres préoccupations, elles aussi directement imputables à une trop forte consommation énergétique, comme l'épuisement et le renchérissement des ressources énergétiques.

Ces problématiques poussent différents secteurs de l'économie à réfléchir à de nouvelles offres de biens et services "très basses émissions". En France, le secteur du bâtiment est responsable de 23% des émissions directes de gaz à effet de serre et 45% des consommations d'énergie finale. Dans le but de parvenir à une diminution par 4 des émissions de gaz à effet de serre, il est nécessaire, en plus de procéder à une rénovation massive du parc existant, de concevoir des bâtiments neufs très efficaces.

Parallèlement, les acteurs de l'industrie du bâtiment souhaitent dépasser leur statut d'entreprises "assemblières" pour devenir des entreprises "ensemblières", c'est-à-dire d'aller plus loin que la seule construction en développant des offres en conception-construction. Le problème qui leur est posé est d'élaborer des concepts de bâtiments à forte efficacité énergétique. Dans cette optique, il leur faut disposer des outils d'ingénierie capables de les évaluer.

I-2) EXPOSÉ DU PROBLÈME

I-2-1) PROBLÉMATIQUES DE CONCEPTION

De nombreuses études et retours d'expériences ([GOULDING, 1993], [SIDLER, 2000], [PREBAT, 2007], [EFFINERGIE, 2008], [THIERS, 2008], Minergie¹, Passivhaus²), sur les bâtiments les plus performants montrent que la diminution des consommations énergétiques passe par une conception architecturale prenant en compte la compacité du bâtiment et la gestion des apports solaires passifs, une sur-isolation de l'enveloppe (mur et vitrages) et, dans la plupart des cas, la mise en place d'une ventilation double-flux avec récupération de chaleur.

Cette dernière technologie, contrairement à une installation simple flux qui consiste en une mise en dépression d'un logement permettant un renouvellement d'air par des entrées positionnées en façade, extrait l'air vicié et insuffle l'air neuf. Ce fonctionnement rend plus sensible le renouvellement d'air du logement à la ventilation naturelle due au vent et au tirage thermique, c'est-à-dire aux infiltrations d'air par les défauts d'étanchéité de l'enveloppe (cf Figure 1). Par exemple, pour un système avec une efficacité d'échangeur de 80 %, qui doit

¹ <http://www.minergie.ch/>

² <http://www.passiv.de/>

renouveler un demi-volume par heure d'un bâtiment, une infiltration parasite de $0,1 \text{ vol.h}^{-1}$ correspondra à une efficacité effective d'échangeur de 40%.

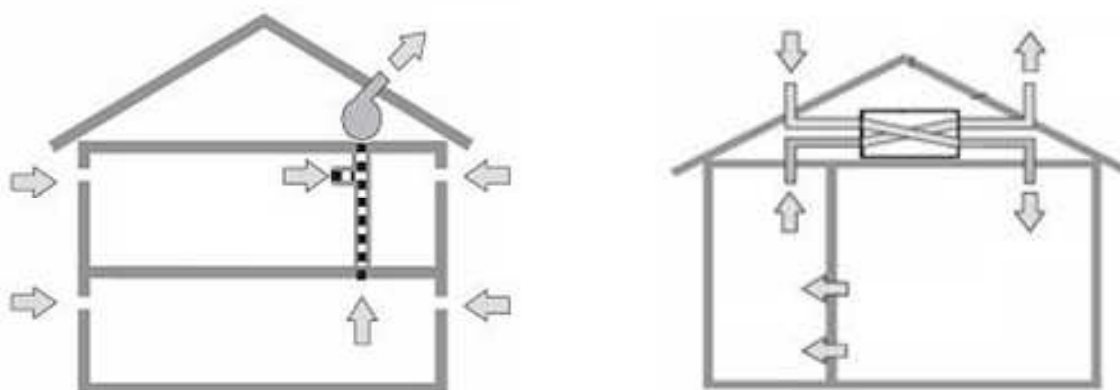


Figure 1 Principe de fonctionnement d'une installation simple flux (gauche) et double flux (droite), [LIDDAMENT, 1996]

Ces défauts d'étanchéité à l'air sont les orifices existants et non désirés de l'enveloppe. La perméabilité à l'air d'un bâtiment est mesurée (par exemple par un test de porte soufflante) et elle peut être quantifiée par un niveau de renouvellement d'air par m^2 de paroi déperditive sous 4 Pa (I_4 en $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ pour un m^2 d'enveloppe). On trouve aussi fréquemment un niveau d'étanchéité, n_{50} , présenté en renouvellement d'air sous 50 Pa (les différents modes de mesure et indices de référence sont développés dans [CARRIÉ & AL, 2006]).

En France, le degré de perméabilité à l'air (ou d'étanchéité) des bâtiments devient un objectif de performance à part entière, en complément de l'objectif de performance énergétique. En effet, dans le cadre du comité opérationnel "bâtiments neufs" du Grenelle de l'environnement, il est préconisé que ces derniers devront respecter le niveau de performance BBC (Bâtiment Basse Consommation).

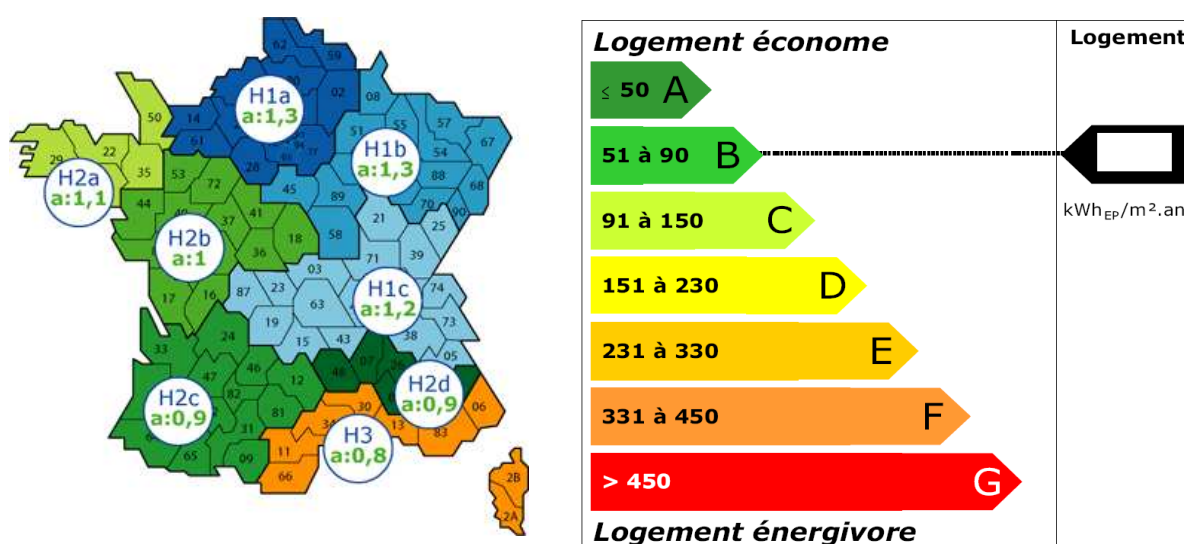


Figure 2 Coefficient de rigueur climatique à appliquer à l'objectif annuel de $50 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2$ selon la localisation géographique du bâtiment dans le cadre du label BBC

Cette performance est caractérisée d'une part par un niveau annuel de consommation énergétique inférieur à $50 \text{ kWh}_{EP}.\text{m}^{-2}$ (à moduler selon la zone géographique par les

coefficients présentés sur la Figure 2) pour le chauffage, la climatisation, la production d'eau chaude sanitaire, l'éclairage et la consommation des auxiliaires (un coefficient de conversion de 2,58 est utilisé pour passer des consommations d'électricité à la consommation d'énergie primaire). D'autre part, le bâtiment doit présenter un degré de perméabilité à l'air correspondant aux préconisations énoncées dans le Tableau 1.

Maisons individuelles	Bâtiments de logements collectifs	Bureaux, hotels, restauration, enseignement, petits commerces et établissements sanitaires	Autres
< 0,6	< 1	< 1,7	< 3

Tableau 1 Niveaux de perméabilité à l'air exigé pour les bâtiments neufs dans le cadre du label Bâtiment Basse Consommation ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ sous 4 Pa)

D'autre part, le renforcement de l'isolation des bâtiments, qui a pour but de diminuer les besoins de chauffage, peut entraîner une augmentation de la température donc de l'inconfort des occupants ou même engendrer des besoins de climatisation. Une des techniques employée pour diminuer la température dans les bâtiments l'été est la surventilation nocturne.

De la même manière que les infiltrations d'air par les défauts d'étanchéité de l'enveloppe, le renouvellement de l'air dépendra de plusieurs paramètres. Certains découlent des choix architecturaux du bâtiment (possibilité de mettre en place une ventilation traversante, exposition au vent du site, etc.), d'autres seront directement liés aux phénomènes moteurs de la ventilation naturelle (différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, vitesse et orientation du vent).

Pour étudier ces deux problématiques dans le cadre de la conception d'un bâtiment à la fois économe en énergie et confortable l'été, il est nécessaire de disposer d'un outil capable de modéliser les transferts aérauliques au niveau du bâtiment. Cette modélisation permettra d'affiner les calculs thermiques.

I-2-2) OUTILS DISPONIBLES

Il existe actuellement des outils d'ingénierie du bâtiment traitant les deux approches séparément. Certains permettent de simuler le comportement thermique, le renouvellement d'air dû aux infiltrations est alors une des données d'entrée du modèle. D'autres permettent d'évaluer les mouvements d'air, ce sont alors les températures (des zones ou) du bâtiment qui sont fixées en entrée.

On recense quelques approches (comme [WEBER & AL, 2003] et [HENSEN, 1991]) qui ont consisté en un couplage de ces deux types de modèles, mais il s'agit d'outils lourds et, la plupart du temps, dont les objectifs initiaux diffèrent (simulation thermique et évaluation de la qualité de l'air). En pratique, ces outils sont destinés à être utilisés dans le cadre d'un travail de recherche.

Enfin, malgré le besoin d'outils d'éco-conception, aucun outil de simulation thermo-aéraulique ne permet le chaînage avec un outil d'analyse de cycle de vie (ACV) des bâtiments.

I-3) OBJECTIFS DE LA THÈSE, ORIGINALITÉ

L'objectif du travail de thèse est de développer un outil permettant de traiter les problématiques de conception liées au renouvellement de l'air dans les bâtiments, en particulier l'étanchéité à l'air et l'amélioration du confort d'été par ventilation nocturne naturelle.

Ce travail s'appuie sur les recherches préalables du Centre Energétique et Procédés de MinesParistech : les outils de simulation thermique dynamique COMFIE et d'ACV des bâtiments EQUER.

Il s'agit de développer un modèle aéraulique adapté et couplé à la simulation thermique simplifiée et pouvant s'inscrire dans une démarche d'éco-conception des bâtiments. Répondant aux besoins des professionnels du bâtiment, cet outil permettra en particulier :

- ✓ Une aide en phase amont (esquisse, APS) ;
- ✓ La possibilité d'effectuer de nombreux calculs en un temps restreint, optimisation, ce qui permet des études de régulation au cours du temps ;
- ✓ La possibilité d'étudier un ensemble de bâtiments, par exemple un parc géré par un organisme ou un quartier (voir [TROCMÉ & PEUPORTIER, 2008]) ;
- ✓ La possibilité de couplage avec un outil d'ACV.

I-4) DÉMARCHE

Pour répondre à ces objectifs, un recensement des techniques de modélisation des transferts aérauliques dans les bâtiments a été réalisé dans le **CHAPITRE II**. Si on répertorie jusqu'à treize sortes de modèle, on peut les regrouper en quatre catégories selon le niveau de performance attendu par le modélisateur. Les modèles mono-zone dans lesquels on considère uniquement l'enveloppe, avec des caractéristiques internes homogènes. Les modèles multi-zone permettant d'évaluer les débits d'air en prenant en compte l'hétérogénéité des températures entre les zones du bâtiment, pour lesquelles ont fait l'hypothèse d'un mélange parfait. Les modèles zonaux où les zones sont elles mêmes discrétisées afin de caractériser avec plus de précision leur ambiance (stratification thermique et allure des écoulements simples). Enfin la simulation par code de champs, qui permet de caractériser avec précision les phénomènes thermiques et aérauliques, mais qui présente des temps de calculs longs et ne permet de modéliser ces phénomènes que sur des durées très courtes.

Dans le **CHAPITRE III**, le modèle mis en place est décrit. Il prend en compte les différents composants de l'enveloppe et les ouvertures internes, caractérisés par des lois de puissance reliant le débit à la différence de pression de type : $\dot{m} = K\Delta P^n$.

Le couplage entre la partie thermique et aéraulique prend en compte l'interaction entre les deux phénomènes. A chaque pas de temps, les débits d'air inter-zones permettent d'évaluer plus finement les températures de zones, ces dernières permettent à leur tour d'ajuster la valeur des débits d'air. Une approche de couplage synchrone est retenue.

Les résultats du modèle aéraulique sont enfin confrontés à des résultats analytiques, puis à ceux des principaux logiciels de simulation aéraulique. Le couplage est validé par comparaison avec le logiciel TRNFLOW.

Afin d'intégrer la conception énergétique au sein d'une démarche d'éco-conception, on recense, dans le **CHAPITRE IV**, les impacts environnementaux générés par une étanchéification pendant la phase de construction. Ces informations viennent compléter un outil d'ACV des bâtiments.

Enfin, les outils de conception sont appliqués à deux bâtiments dans le **CHAPITRE V**. On étudie d'abord un projet de bâtiment urbain présentant une mixité fonctionnelle (commerces, bureaux et logements). L'influence des infiltrations d'air sur les besoins de chauffage et le potentiel de rafraîchissement nocturne sont analysés. Ensuite l'influence des infiltrations d'air pour différents types de ventilation est étudiée sur un projet de logements en Belgique ; on détermine enfin les impacts environnementaux générés et évités par les travaux d'étanchéité sur le bâtiment, afin d'établir un bilan global.

CHAPITRE II

MODÉLISATION DES TRANSFERTS AÉRAULIQUES DANS LES BÂTIMENTS

Dans ce chapitre, un état de l'art de la modélisation des mouvements d'air dans le bâtiment est présenté. Celui-ci permettra de choisir l'approche la plus pertinente permettant de caractériser le renouvellement d'air dans un outil d'aide à la conception. Les résultats seront appliqués à l'outil de simulation thermique COMFIE.

Dans un bâtiment, les mouvements d'air peuvent être modélisés de façon plus ou moins précise. Le niveau de précision variera d'une évaluation globale des flux d'air (cas d'un modèle empirique) à une évaluation précise des caractéristiques de l'écoulement (cas d'une modélisation par code de champs).

Dans la littérature (comme [LIDDAMENT, 1996], [ALLARD & AL., 1998], [MORA, 2003], [AXLEY, 2001]) on trouve une multitude d'approches permettant la caractérisation aéraulique d'un bâtiment. [AXLEY, 2001] répertorie jusqu'à treize sortes de modèles ! On peut cependant en identifier quatre catégories en fonction du niveau de finesse adopté pour étudier le bâtiment :

- ✓ Monozone
- ✓ Multi-zone
- ✓ Zonal
- ✓ CFD (Computational Fluid Dynamics)

II-1) MODÈLES MONO-ZONE

En utilisant un modèle mono-zone, on considère le bâtiment comme une enveloppe dont l'intérieur possède des propriétés uniformes (température, pression, concentration de polluant...). Ces modèles permettent une évaluation globale des débits d'air au niveau du bâtiment en entrant les caractéristiques de son enveloppe. Ils constituent une approche intéressante et permettent de se faire une bonne idée du fonctionnement global d'un bâtiment. [ALLARD & AL., 1998] répertorient les principaux modèles existants.

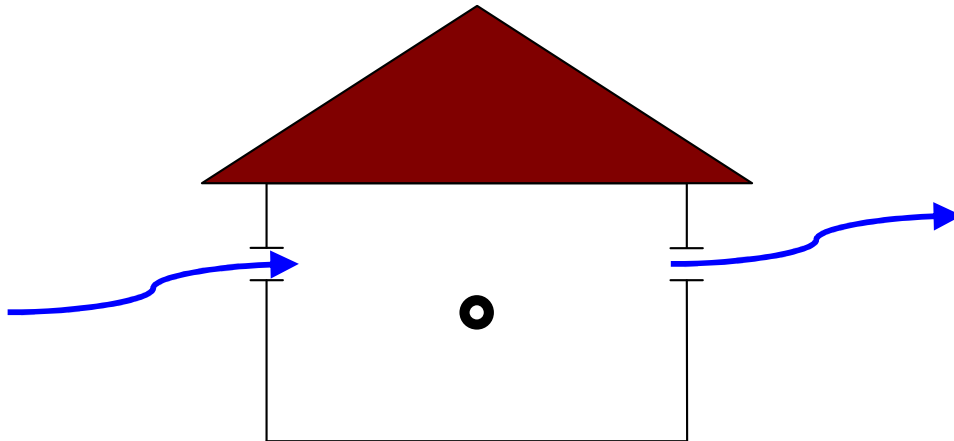


Figure 3 Représentation du problème dans le cas d'une modélisation monozone

Etant basés sur des hypothèses simplificatrices (sur la configuration du bâtiment et sur les paramètres influant les mouvements d'air), ils ne permettent pas de traiter de la problématique du confort ou l'efficacité de la ventilation pièce par pièce qui nécessitent le détail du fonctionnement interne du bâtiment. Ils permettent cependant la mise en place de calculs réglementaires forfaitaires, aisément mis en œuvre par l'industrie du bâtiment, et répondent ainsi aux besoins premiers d'optimisation.

Dans ce premier chapitre, trois catégories de modèles mono-zone sont présentées. Dans un premier temps, il s'agit d'un modèle empirique où le renouvellement d'air à travers l'enveloppe est uniquement évalué en fonction de la perméabilité à l'air de l'enveloppe. Ensuite, le modèle du Lawrence Berkeley National Laboratory introduit la prise en compte des phénomènes physiques moteurs. Enfin, le modèle d'évaluation des débits d'air à travers l'enveloppe de la Réglementation Thermique 2005 prend en compte les phénomènes physiques moteurs et amorce une distribution des défauts d'étanchéité et des entrées d'air sur l'ensemble de l'enveloppe.

II-1-1) ESTIMATION À PARTIR DE LA PERMÉABILITÉ À L'AIR DU BÂTIMENT

Pour déterminer les débits de renouvellement d'air d'un bâtiment, une première approche consiste à les déduire en fonction de la perméabilité globale de l'enveloppe. La méthode la plus simple est celle proposée par [DUBRUL, 1988] qui propose une estimation simplifiée du débit d'infiltration d'air à partir de la valeur de n_{50} (renouvellement d'air sous 50 Pa).

$$Q_{v\text{ inf}} = \frac{n_{50}}{20} \quad (1)$$

Avec

$Q_{V_{inf}}$	Débit d'infiltration d'air	(vol.h ⁻¹)
n_{50}	Renouvellement d'air sous 50 Pa	(vol.h ⁻¹)

S'il est évident que cette méthode néglige certains paramètres, son application permet cependant d'obtenir un ordre de grandeur correct sur le débit d'air provoqué par les infiltrations.

Une variante de cette écriture est proposée dans la norme de calcul des déperditions calorifiques de base [NF EN 12831, 2004].

Le débit d'air d'infiltration, $V_{inf,i}$ en m³.h⁻¹, pour l'espace chauffé i, induit par le vent et le tirage thermique sur l'enveloppe du bâtiment, y est calculé par :

$$V_{inf,i} = 2V_i n_{50} e_i \varepsilon_i \quad (2)$$

Avec

V_i	Volume de l'espace chauffé i	(m ³)
n_{50}	Taux horaire de renouvellement d'air (h ⁻¹), résultant d'une différence de pression de 50 Pa entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment	(m ³ .h ⁻¹)
e_i	Coefficient d'exposition	(-)
ε_i	Facteur correctif de hauteur, prenant en compte l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur de l'espace considéré au-dessus du niveau du sol	(-)

La valeur de n_{50} étant donnée pour le bâtiment entier, un facteur 2 est introduit dans l'équation pour prendre en compte le cas le plus défavorable, dans lequel tout l'air d'infiltration entre sur une seule face du bâtiment.

Des valeurs par défaut de n_{50} sont données pour différents types de construction de bâtiments (cf. Tableau 2).

Construction	n_{50} (h ⁻¹)		
	<i>Degré d'étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment (qualité des joints de fenêtre)</i>		
	Elevé (joints des fenêtres et portes de haute qualité)	Moyen (fenêtres à double vitrage, joints normaux)	Bas (fenêtres à simple vitrage, pas de joints)
Maisons individuelles	< 4	4 - 10	> 10
Bâtiments, autres logements	< 2	2 - 5	> 5

Tableau 2 Degré d'étanchéité à l'air du bâtiment [NF EN 12831, 2004]

Les valeurs par défaut du coefficient d'exposition et du facteur de correction de hauteur sont données dans les tableaux de la page 20.

Classe d'exposition	e_i		
	Espaces chauffés sans ouvertures exposées	Espace chauffé avec une ouverture exposée	Espace chauffé avec plus d'une ouverture exposée
Site non abrité (bâtiments en zone ventée, bâtiments de grande hauteur en centre ville)	0	0,03	0,05
Site modérément abrité (bâtiments en campagne protégés par des arbres ou par d'autres bâtiments, banlieues)	0	0,02	0,03
Site très abrité (bâtiments de taille moyenne en centre ville, bâtiments en forêt)	0	0,01	0,02

Tableau 3 Classe d'exposition du bâtiment [NF EN 12831, 2004]

Hauteur de l'espace chauffé au dessus du sol (du centre du local au niveau du sol)	ε_i
0 – 10 m	1,0
> 10 – 30 m	1,2
> 30 m	1,5

Tableau 4 Hauteur de l'espace chauffé au dessus du sol Tableau [NF EN 12831, 2004]

La perméabilité à l'air de l'enveloppe n'est qu'un des facteurs influençant le renouvellement d'air à travers l'enveloppe. Cette approche néglige les phénomènes physiques moteurs (vent et tirage thermique du à la différence de température) qui vont influencer sur les mouvements d'air entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Des modèles théoriques simplifiés permettent de prendre en compte ces paramètres.

II-1-2) MODÈLES THÉORIQUES SIMPLIFIÉS

Le modèle du LBL, proposé par [SHERMAN & GRIMSRUD, 1980] repose sur l'évaluation du débit d'infiltration à travers l'enveloppe à partir de la valeur de la surface équivalente de fuite du bâtiment. Cette approche prend en compte la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur ainsi que la vitesse du vent (auxquelles on affecte f_s et f_w , des coefficients dépendants des caractéristiques du bâtiment).

On détermine le débit d'infiltration par la relation suivante :

$$Q_{\text{inf}} = ELA \sqrt{f_s^2 \Delta T + f_w^2 U_z} \quad (3)$$

$$f_s = \left(\frac{1+R/2}{3} \right) \left(1 - \frac{X^2}{(2-R)^2} \right)^{3/2} \left(\frac{gh}{T_o} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$f_w = C'(1-R)^{1/3} \quad (5)$$

$$R = \frac{ELA_{\text{toiture}} + ELA_{\text{plancher}}}{ELA} \quad (6)$$

$$X = \frac{ELA_{\text{toiture}} - ELA_{\text{plancher}}}{ELA} \quad (7)$$

Avec

C'	Degré d'exposition au vent	(-)
U_z	Vitesse du vent sur le site à l'altitude z	(m.s ⁻¹)
ΔT	Différence de température l'intérieur et l'extérieur	(K)
T_o	Température intérieure	(K)
ELA	Surface équivalente de fuite du bâtiment (évaluée par une mesure sur le site)	(m ²)
h	Hauteur entre la fuite la plus haute et la plus basse	(m)
g	Accélération de la pesanteur	(m.s ⁻²)

Degré d'exposition	I (Aucune)	II (Faible)	III (Modérée)	IV (Importante)	V (Très importante)
C'	0,34	0,3	0,25	0,19	0,11

Tableau 5 Degré d'exposition au vent du bâtiment [SHERMAN & GRIMSRUD, 1980]

La vitesse du vent issue des données météorologique est ramenée à celle du site par une loi de puissance prenant en compte les caractéristiques du site (exposition au vent et rugosité du terrain) :

$$U_z = U_{z'} \frac{\alpha(z/10)^\gamma}{\alpha'(z'/10)^{\gamma'}} \quad (8)$$

Avec

U_z	Vitesse du vent sur le site à l'altitude z	(m.s ⁻¹)
$U_{z'}$	Vitesse du vent sur le site à l'altitude z'	(m.s ⁻¹)
α et γ	Constantes dépendantes des conditions du terrain	(-)
α' et γ'	Constantes dépendantes des conditions du terrain de la station météorologique	(-)

Description du terrain	γ et γ'	α et α'
Périmètre dégagé de 5 km autour d'un plan d'eau	0,10	1,30
Terrain avec obstacles isolés (bâtiments ou arbres éloignés les uns des autres)	0,15	1,00
Espace rural (arbres, petits bâtiments...)	0,20	0,85
Espace urbain, industriel ou forestier	0,25	0,67
Centre urbain dense	0,35	0,47

Tableau 6 Paramètres de description du terrain [SHERMAN & GRIMSRUD, 1980]

[ASHRAE, 2005] propose une reformulation simplifiée du modèle en prenant des hypothèses moyennes pour caractériser le bâtiment (conversion des données météorologiques relatives au vent pour un site de type "espace rural", la moitié des infiltrations a lieu au niveau des façades : $R = 0,5$, la répartition des défauts d'étanchéité entre le plancher haut et le plancher bas est égale : $X = 0$, la hauteur d'étage du bâtiment vaut 2,5 m).

$$Q_{\text{inf}} = \frac{E}{1000} \sqrt{C_s \Delta T + C_w U^2} \quad (9)$$

Avec

Q_{inf}	Débit d'infiltration	$(m^3.s^{-1})$
E	Surface de fuite équivalente	(cm^2)
C_s	Coefficient de tirage thermique	$(L^2.s^{-2}.cm^{-4}.K^{-1})$
ΔT	Différence moyenne de température sur l'intervalle de calcul	(K)
C_w	Coefficient de pression du vent	$(L^2.s^{-2}.cm^{-4}.m^{-2}.s^{-2})$
U	Vitesse du vent à la station météorologique	$(m.s^{-1})$

	Nombre d'étages		
	1	2	3
C_s	0,000 145	0,000 290	0,000 435

Tableau 7 Coefficient de tirage thermique en fonction du nombre d'étages [ASHRAE, 2005]

Degré d'exposition	Nombre d'étages		
	1	2	3
I	0,000 319	0,000 420	0,000 494
II	0,000 246	0,000 325	0,000 382
III	0,000 174	0,000 231	0,000 271
IV	0,000 104	0,000 137	0,000 161
V	0,000 032	0,000 042	0,000 049

Tableau 8 Coefficient de pression au vent pour différentes configurations [ASHRAE, 2005]

Ce type de modèle permet d'obtenir des valeurs moyennes du renouvellement d'air pour le bâtiment dans son ensemble et pour des conditions météorologiques données. En revanche, l'influence de certains composants (entrées d'air, façade...) ne peut être définie ce qui se révèle limitant dans le cadre du développement d'un outil permettant d'évaluer l'influence de choix de conceptions. Dans cette optique, des modèles mono-zone détaillés ont été introduits.

II-1-3) MODÈLES MONO-ZONE DÉTAILLÉS

Dans la littérature, on trouve un certains nombre de modèles mono-zone détaillés, on peut citer Localeaks [WALKER & WILSON, 1994], la norme européenne [NF EN 15242, 2007] ou le modèle Th-CE de [RÉGLEMENTATION THERMIQUE 2005, 2006] présenté ici. [ORME, 1999] répertorie huit modèles de ce type.

Dans le modèle de calcul Th-CE de la réglementation thermique 2005³, le bâtiment est caractérisé par un débit de fuite par m² d'enveloppe sous une dépression de 4 Pa (I_4 en m³.h⁻¹.m² sous 4 Pa). La surface d'enveloppe considérée est la surface des parois déperditives dont sont exclus les planchers bas.

Le Tableau 9 définit les niveaux de performance retenus pour caractériser la perméabilité à l'air des bâtiments. On distingue deux types de valeurs forfaitaires : une valeur de référence est retenue quand le bâtiment a été construit dans le cas d'une démarche qualité de l'étanchéité à l'air. On retient une valeur par défaut dans le cas contraire.

³ Dans ce modèle, le bâtiment est découpé en zones qui correspondent à des usages différents du bâtiment. On parle cependant ici de modèle monozone car au niveau du calcul des débits d'airs, elles sont considérées comme étanches entre elles.

Les débits d'air pris en compte sont les débits d'air extrait et soufflé par le système de ventilation et ceux transitant par l'enveloppe : défauts d'étanchéité et entrées d'air. Ces derniers sont reliés à la différence de pression par une loi de puissance.

Usage	Perméabilité par défaut ($m^3.h^{-1}.m^{-2}$)	Bâtiment justifié ($m^3.h^{-1}.m^{-2}$)
Logement individuel	1,3	0,8
Logements collectifs, bureaux, hotels, restauration, enseignement, petits commerces, établissements sanitaires	1,7	1,2
Autres usages	3,0	2,5

Tableau 9 Valeurs de perméabilité à l'air référence et par défaut, [RÈGLEMENTATION THERMIQUE 2005, 2006]

L'hypothèse de conservation de la masse impose au bâtiment que la somme de ces débits au niveau du bâtiment soit nulle :

$$\dot{m}_{sou} + \dot{m}_{ext} + \sum \dot{m}_{per} + \sum \dot{m}_{ent} = 0 \quad (10)$$

Défauts d'étanchéité

Dans le cas de logements, les défauts d'étanchéité sont répartis sur l'enveloppe (le tableau 10 propose une répartition dans le cas d'un logement traversant, le modèle propose également des répartitions standard dans le cas d'un logement non traversant). Cette répartition permet de distribuer le débit d'infiltration (positif) ou d'exfiltration (négatif) sous 4 Pa pour chaque façade par une relation reliant le débit à la différence de pression selon les équations :

$\Delta P < 0 Pa$	$\Delta P \geq 0 Pa$	
$\dot{m}_{per} = -\frac{\rho_i}{3600} Q_{per_{4Pa}} \left(-\frac{\Delta P}{4} \right)^{2/3}$	$\dot{m}_{per} = \frac{\rho_e}{3600} Q_{per_{4Pa}} \left(\frac{\Delta P}{4} \right)^{2/3}$	(11)

Avec

$Q_{per_{4Pa}}$	Débit volumique à travers le défaut d'étanchéité sous 4 Pa	$(m^3.h^{-1})$
ΔP	Différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur	(Pa)
\dot{m}_{per}	Débit d'air à travers les défauts d'étanchéité	$(kg.s^{-1})$
ρ_i, ρ_e	Masse volumique de l'air (extérieur, intérieur)	$(kg.m^{-3})$

Répartition de la perméabilité à l'air	Façade au vent	Façades latérales	Façade sous le vent
En haut	1/6	1/6	1/6
En bas	1/6	1/6	1/6

Tableau 10 Distribution des défauts d'étanchéité de l'enveloppe, cas d'un logement traversant

Entrées d'air

Les entrées d'air sont aussi distribuées sur les façades, on peut alors obtenir un module d'entrée d'air équivalent pour chaque façade.

Répartition des entrées d'air	Façade au vent	Façades latérales	Façade sous le vent
En haut	1/3	1/3	1/3

Tableau 11 Distribution des entrées d'air, cas d'un logement traversant

Les débits sont ensuite calculés suivant que l'entrée d'air est auto-réglable ou non. La courbe caractéristique retenue est située dans la partie supérieure de la plage de débit (c'est-à-dire la limite haute de l'exigence réglementaire pour le module).

Elle est donnée selon une relation qui met en relation le débit avec la différence de pression de part et d'autre de la bouche d'entrée d'air et son module (le débit en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ qui y transite pour une différence de pression de 20 Pa). Dans le cas d'une entrée d'air auto-réglable on aura :

$$\begin{array}{ccc} \Delta P \leq 0 \text{ Pa} & 0 < \Delta P \leq 20 \text{ Pa} & \Delta P > 20 \text{ Pa} \\ \dot{m}_{ent} = -1,1M \frac{\rho_i^{0,5} \rho_a^{0,5}}{3600} \left(\frac{-\Delta P}{20} \right)^{0,5} & \dot{m}_{ent} = 1,1M \frac{\rho_e^{0,5} \rho_a^{0,5}}{3600} \left(\frac{\Delta P}{20} \right)^{0,5} & \dot{m}_{ent} = \frac{\rho_e^{0,5} \rho_a^{0,5}}{3600} \left(\frac{0,55M\Delta P}{80} + \frac{77M}{80} \right) \end{array} \quad (12)$$

Pour une entrée d'air fixe, le débit sera déterminé par les équations suivantes :

$$\begin{array}{ccc} \Delta P \leq 0 \text{ Pa} & \Delta P > 0 \text{ Pa} \\ \dot{m}_{ent} = -1,1M \frac{\rho_i^{0,5} \rho_a^{0,5}}{3600} \left(\frac{-\Delta P}{20} \right)^{0,5} & \dot{m}_{ent} = 1,1M \frac{\rho_e^{0,5} \rho_a^{0,5}}{3600} \left(\frac{\Delta P}{20} \right)^{0,5} \end{array} \quad (13)$$

Avec

M	Module d'entrée d'air (donnée fabricant)	$(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \text{ sous } 20 \text{ Pa})$
ρ_a	Masse volumique référence	$(1,22 \text{ kg} \cdot \text{m}^3)$

Différence de pression

Sur chaque composant, on calcule une pression équivalente générée par les effets du vent et du tirage thermique selon la relation :

$$P_{ext} = \frac{1}{2} C_p \rho_a (0,9V_e)^2 - \frac{\theta_i - \theta_e}{\theta_{e,ref}} gh \quad (14)$$

Avec

P_{ext}	Pression extérieure exercée sur le composant	(Pa)
V_e	Vitesse du vent	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
C_p	Coefficient de pression	(-)
$\theta_i \theta_e \theta_{e,ref}$	Températures intérieure, extérieure et de référence	(K)
h	Hauteur du composant	(m)

La différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur pour un composant est alors :

$$\Delta P = P_{ext} - P_{int} \quad (15)$$

Hauteur du bâtiment	Façade au vent	Façade latérales	Façade sous le vent
$h_{bat} < 15 \text{ m}$	+ 0,25	- 0,5	- 0,5
$15 < h_{bat} < 50 \text{ m}$	+ 0,45	- 0,5	- 0,5
$h_{bat} > 50 \text{ m}$	+ 0,60	- 0,5	- 0,5

Tableau 12 Coefficients de pression au vent, cas d'un logement traversant

Façade au vent	Façade sous le vent
+ 0,05	- 0,05

Tableau 13 Coefficients de pression au vent, cas d'un logement non traversant

La détermination de la pression intérieure permet enfin d'obtenir les débits.

II-2) MODÈLES MULTI-ZONE

II-2-1) PRINCIPE

Dans un modèle multi-zone (on peut aussi parler de modèle nodal ou en réseau), le bâtiment est représenté par un ensemble de nœuds. Un nœud représente une zone (le plus souvent une pièce ou l'extérieur), caractérisée par des variables d'état uniformes (hypothèse de mélange parfait). Ces zones sont reliées entre elles par des connexions représentant le chemin emprunté par l'air (ouverture de portes et fenêtres, entrée d'air, défauts d'étanchéité de l'enveloppe...).

Une analogie électrique consiste en la représentation du bâtiment par un réseau électrique où les chemins empruntés par l'air représentent différents types de résistance (porte ouverte ou fermée, fissure) à l'air et où la pression est imposée à chaque nœud.

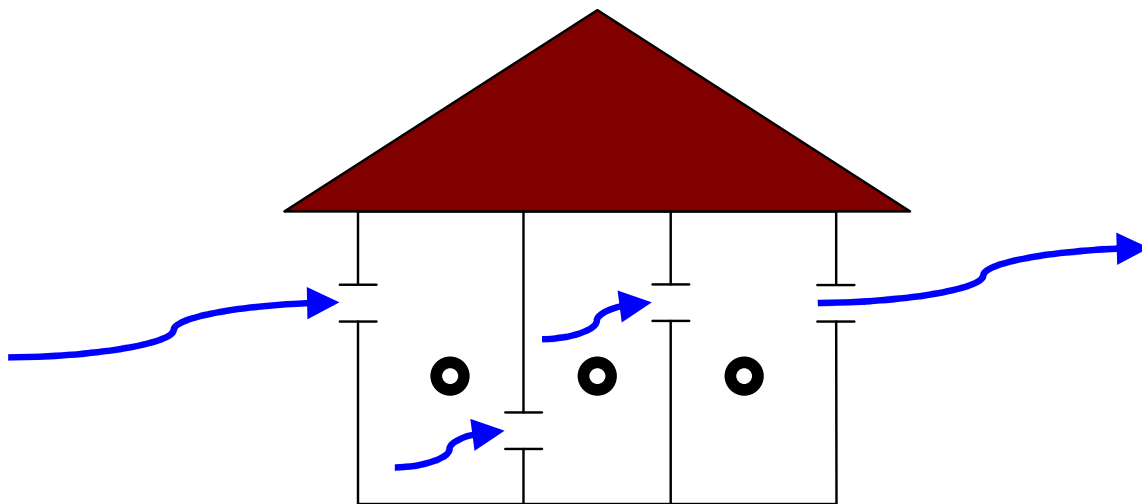


Figure 4 Représentation du problème dans le cas d'une modélisation multizone

Un état de l'art réalisé par [FEUSTEL & DIERIS, 1992] recense une cinquantaine de modèles de ce type. Dans ce type de modèles, on retrouve COMIS [FEUSTEL, 1999], CONTAM [WALTON & DOLS, 2006] et ESP-r [HENSEN, 1991].

De nombreuses études [PERSILY & AL., 2003] [BLOMSTERBERG & AL., 1999] ont mis en évidence la validité de ces modèles en comparant les résultats à des mesures expérimentales sur site. Les travaux de [HAGHIGHAT, 2003] ont permis de mettre en évidence des résultats cohérents entre ces trois modèles.

Pour simplifier la modélisation des transferts aérauliques, les modèles multi-zone s'appuient sur les hypothèses suivantes :

Mélange parfait

A chaque pas de temps, la zone est caractérisée par une température uniforme (donnée par l'utilisateur) et une pression de référence (inconnue du problème) à une hauteur de référence constante. Au sein de la zone, la pression varie de façon hydrostatique par rapport à la pression de référence.

Conservation de la masse

On considère que la masse d'air de chaque zone se conserve, ce principe implique que le débit d'air entrant dans une zone est égal au débit d'air sortant.

Connexions aérauliques

Les connexions aérauliques entre les différentes zones sont représentées par des lois empiriques ou semi-empiriques reliant le débit d'air entre les zones à la différence de pression entre ces dernières. Les différences de pression sont calculées par la relation de Bernoulli.

Influence de la température

La température est fixe (et fixée par l'utilisateur) pour tout le pas de temps. Ces températures permettent de calculer la pression due au tirage thermique entre deux zones (pression constante sur le pas de temps).

II-2-2) PRISE EN COMPTE DES PHÉNOMÈNES PHYSIQUES AUX ORIGINES DES TRANSFERTS AÉRAULIQUES

II-2-2-1) RELATION DE BERNOULLI

La différence de pression rencontrée à chaque connexion permet d'établir une valeur du débit d'air y transitant. Dans le cas d'un écoulement permanent, pour un fluide réel incompressible, la relation de Bernoulli permet de déterminer la différence de pression entre deux zones :

$$\Delta P = (P_{i,0} + \frac{\rho_i V_i^2}{2}) - (P_{j,0} + \frac{\rho_j V_j^2}{2}) + (\rho_i - \rho_j)g(z_i - z_j) \quad (16)$$

Avec

$P_{i,0}, P_{j,0}$	Pressions de référence des zones i et j	(Pa)
ρ_i, ρ_j	Masse volumique de l'air des zones i et j	(kg.m ⁻³)
g	Accélération de la pesanteur	(m.s ⁻²)
V_i, V_j	Vitesse de l'air à l'entrée et la sortie de la connexion	(m.s ⁻¹)
z_i, z_j	Altitude de la connexion	(m)

A chaque nœud on prend en compte la pression, la masse volumique de l'air (déterminée à l'aide de la température de zone) et une hauteur de référence. La hauteur de référence du nœud est utilisée pour calculer la différence de pression induite par le tirage thermique. Deux zones peuvent être connectées à des hauteurs différentes de leur hauteur de référence.

Par convention, la différence de pression entre les zones i et j vaut $\Delta P_{i \rightarrow j} = P_i - P_j$. Si cette valeur est positive, le débit d'air induit sortira de la zone, dans le cas contraire il rentre.

II-2-2-2) TIRAGE THERMIQUE

Variation hydrostatique de la pression

L'air au repos est soumis au champ de gravité g . Le tirage thermique est causé par la différence de pression hydrostatique entre deux colonnes d'air. Dans la zone considérée, la pression hydrostatique dépend de la masse volumique de l'air et de l'éloignement à un point de référence :

$$P_i(z) = P_{i,0} - \rho_i g z \quad (17)$$

Avec

$P_i(z)$	Pression statique dans la zone i à l'altitude z	(Pa)
$P_{i,0}$	Pression de référence de la zone i	(Pa)
ρ_i	Masse volumique de l'air dans la zone i	(kg.m^{-3})
g	Accélération de la pesanteur	(m.s^{-2})

Masse volumique de l'air

La masse volumique de l'air s'exprime en fonction de la pression, de la température et de l'humidité selon la définition psychrométrique par l'équation suivante :

$$\rho = \frac{P}{461,518T(\%H + 0,62198)}(1 + \%H) \quad (18)$$

Avec

P	Pression de l'air	(Pa)
T	Température de l'air	(K)
$\%H$	Humidité relative de l'air	(-)

Pour un bâtiment, la variation de pression ($\approx 12 \text{ Pa/m}$) est négligeable par rapport à la valeur de la pression atmosphérique, on va donc supposer que la variation de la masse volumique de l'air dépend uniquement de sa variation de température. La relation des gaz parfait pour l'air sec devient alors :

$$\frac{P}{r} = \rho_0 T_0 = \rho T \approx \text{CONSTANTE} \quad (19)$$

Par exemple, on peut fixer $\rho_0 = 1,2929 \text{ kg/m}^3$ et $T_0 = 273,15 \text{ K}$ (cas des conditions standard de température et de pression pour l'air sec).

Différence de pression induite entre deux zones

Quand deux zones (par exemple l'intérieur et l'extérieur) présentent une différence de température, le phénomène de tirage thermique intervient et provoque un écoulement d'air entre ces deux zones.

Dans le cas d'une différence de température entre le bâtiment et l'extérieur et d'absence de vent, la différence de pression due au tirage thermique pour une fissure horizontale et en considérant de l'air sec, on écrira :

$$\Delta P_T = P_e - P_i = P_{e,0} - P_{i,0} + \rho_e \left(\frac{T_e}{T_i} - 1 \right) g z \quad (20)$$

Avec

$P_{e,0}, P_{i,0}$	Pressions de référence intérieures et extérieures	(Pa)
ρ_e	Masse volumique de l'air extérieur	(kg.m ⁻³)
T_e, T_i	Températures intérieure et extérieure	(K)

Au niveau du bâtiment, la répartition des pressions créées par le tirage thermique est caractérisée par un plan de pression neutre. On définit ce plan neutre comme la hauteur (ou les hauteurs) de l'enveloppe où la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur est nulle [ASHRAE, 2005]. La position du plan neutre est influencée par le positionnement des ouvertures, des défauts d'étanchéité de l'enveloppe des installations de ventilation, de cheminées...

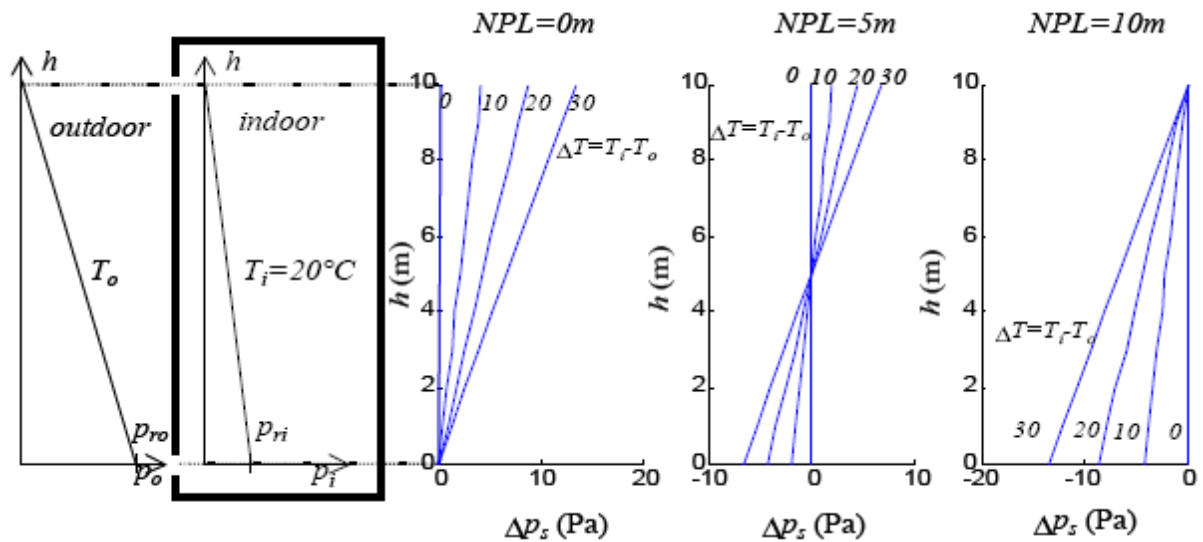


Figure 5 Différences de pression dans un bâtiment pour différentes positions du plan neutre⁴

On peut réécrire l'équation précédente en intégrant le plan de pression neutre Z_N :

$$\Delta P_T = \rho_e \left(\frac{T_e}{T_i} - 1 \right) g (Z_N - z) \quad (21)$$

⁴ http://www.learn.londonmet.ac.uk/packages/tareb/fr/index_special.html

On peut généraliser l'écriture de la différence de pression due au tirage thermique entre deux zones comme le proposent [FEUSTEL & RAYNER-HOSEN, 1990]. Pour chaque zone (cf. Figure 6), on considère une hauteur, pression, température et masse volumique de référence (z_M , P_M , T_M , ρ_M). Les pressions au niveau des ouvertures se calculent par la variation hydrostatique de la pression :

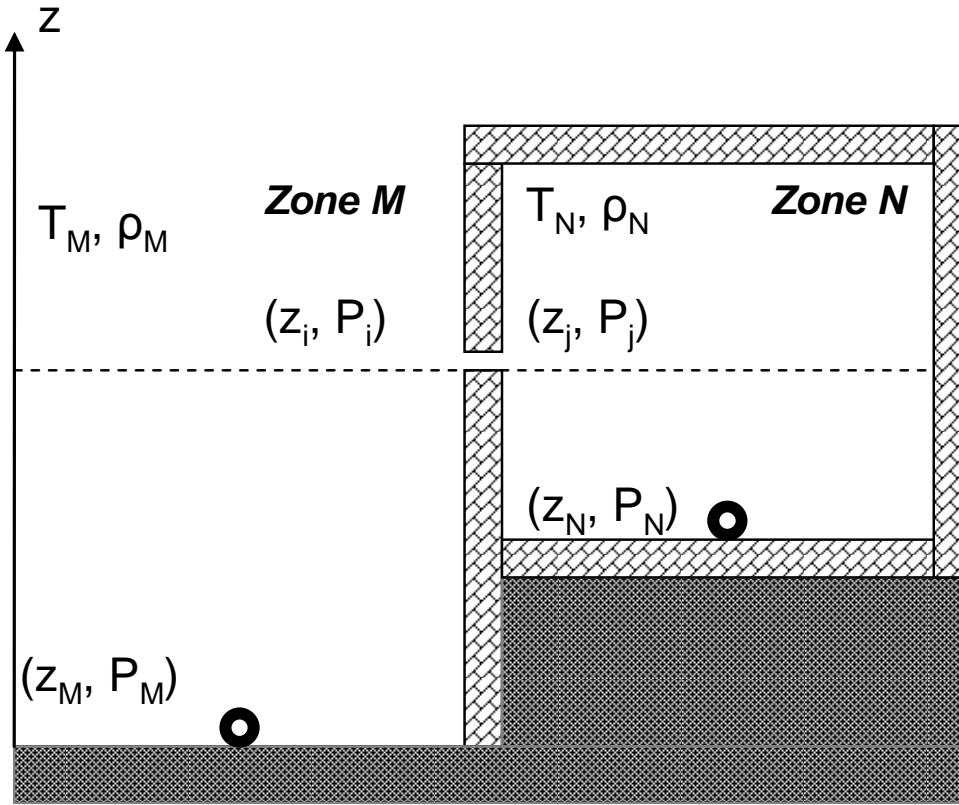


Figure 6 Illustration du problème pour deux zones

$$P_i = P_M + \rho_M g(z_M - z_i) \quad (22)$$

$$P_j = P_N + \rho_N g(z_N - z_j) \quad (23)$$

La différence de pression entre deux zones peut alors s'écrire :

$$\Delta P = P_i - P_j = P_M - P_N + P_T \quad (24)$$

Avec la différence de pression due au tirage thermique :

$$P_T = \rho_M g(z_M - z_i) - \rho_N g(z_N - z_j) \quad (25)$$

II-2-2-3) EFFETS DU VENT

La pression exercée par le vent sur le bâtiment constitue la condition aux limites prépondérante dans l'évaluation des débits d'air. Pour la déterminer, il est important d'adapter les données disponibles (vitesse et orientation du vent mesurées au niveau d'une station météorologique) aux caractéristiques du site (rugosité du terrain, présence d'obstacles).

Pression exercée par le vent

Le vent, autour du bâtiment, génère un champ de vitesses et de pressions. Les façades situées face au vent ($0^\circ < \theta < 90^\circ$, avec θ l'angle d'incidence du vent) présentent des surpressions alors que les façades sous le vent ($90^\circ < \theta < 180^\circ$) et parallèles à l'écoulement d'air présentent des dépressions.

Pour un écoulement libre, la relation entre la pression et la vitesse d'une ligne de courant peut être obtenue par l'équation de Bernoulli. En considérant la masse volumique constante, on obtient :

$$P_{\text{stat}} + 0,5 \rho v^2 = \text{Constante} \quad (26)$$

Le terme $0,5 \rho v^2$ représente la dynamique P_{dyn} ou pression d'arrêt. Il témoigne de la pression qui serait exercée par la ligne de courant sur un obstacle infiniment petit qui s'y opposerait sans perturber l'écoulement.

Quand l'obstacle n'est pas infiniment petit, on constate expérimentalement que la pression réelle P_k , exercée par l'écoulement sur un point k (x, y, z) est directement proportionnelle à la pression dynamique du fluide.

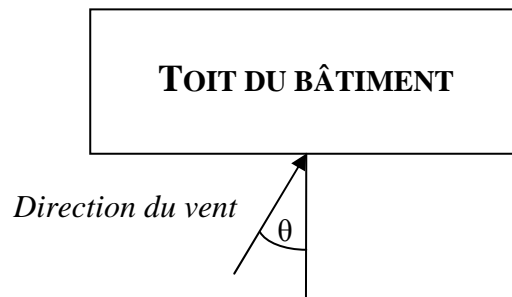


Figure 7 Orientation du vent sur un bâtiment

Afin de quantifier la distribution de la pression exercée par le vent sur l'enveloppe d'un bâtiment, on introduit des coefficients de pression. [FEUSTEL & RAYNER-HOSEN, 1990] définissent le coefficient de pression C_{pk} au point k (x, y, z) pour une pression dynamique de référence (à la hauteur de référence z_{ref}) et pour un angle d'incidence du vent donné θ :

$$C_{p_k}(z_{\text{ref}}, \theta) = \frac{P_k - P_o(z)}{P_{\text{dyn}}(z_{\text{ref}})} \quad (27)$$

Avec

$$P_{\text{dyn}}(z_{\text{ref}}) = \frac{\rho_0 v^2(z_{\text{ref}})}{2} \quad (28)$$

P_k	Pression mesurée au point k	(Pa)
$P_o(z)$	Pression statique au point k , déterminée à partir de la pression atmosphérique de référence P_o :	(Pa)

$$P_o(z) = P_o - \rho g z \quad (29)$$

La pression exercée par le vent sur l'enveloppe du bâtiment constitue la condition aux limites du modèle. Son expression, pour un point donné de l'enveloppe du bâtiment, est :

$$P_v = \frac{\rho V_H^2}{2} C_p \quad (30)$$

Avec

V_H	Vitesse du vent à la hauteur de référence du bâtiment (en général la hauteur du bâtiment)	(m.s ⁻¹)
ρ	masse volumique de l'air	(kg.m ⁻³)
C_p	coefficient de pression	(-)

La pression du vent agit de façon positive ou négative selon l'exposition de la façade. Dans le cas où une des deux zones est l'extérieur, on peut réécrire la différence de pression à travers une ouverture de la manière suivante :

$$\Delta P = P_i - P_j = P_M - P_N + P_T + P_V \quad (31)$$

Détermination de la vitesse du vent au site

Les données météorologiques sur la vitesse du vent sont des vitesses et directions moyennes issues de relevés de stations météorologiques. Ces relevés sont le plus souvent réalisés sur un aéroport à une hauteur de 10 m. Les caractéristiques du site étudié étant en général différentes, il convient de convertir ces données en une valeur qui soit plus représentative de l'environnement du bâtiment à une hauteur de référence (sa hauteur).

Une première approche consiste à procéder directement à des mesures sur le site. Dans le cas où de telles mesures ne seraient pas disponibles, il existe plusieurs expressions caractérisant le profil du vent pour un site donné en fonction de paramètres liés au terrain et de la vitesse moyenne du vent à la station météorologique la plus proche.

[FEUSTEL & RAYNER-HOSEN, 1990] proposent de caractériser l'évolution de la vitesse du vent à la hauteur de référence en fonction de la vitesse du vent mesurée à la station météorologique et selon la loi de puissance suivante :

$$\frac{v(z)}{v_{met}} = \left(\frac{z}{z_{met}} \right)^\alpha \quad (32)$$

Avec

$v(z)$	Vitesse du vent à l'altitude z	(m.s ⁻¹)
v_{met}	Vitesse du vent à la station météorologique d'altitude z _{met}	(m.s ⁻¹)
α	Exposant témoignant de la rugosité du terrain	(-)

Description du terrain	Hauteur de la couche limite (m)	Exposant α
Terrain plat et dégagé	270	0,14
Suburbain	390	0,28
Urbain	510	0,4

Tableau 14 Exposants de rugosité du terrain pour plusieurs hauteurs de couche limite [FEUSTEL, 1999]

[LIDDAMENT, 1996] propose également une loi empirique de puissance :

$$v(z) = v_{met} k z^a \quad (33)$$

Avec

k, a Constantes dépendant du terrain (-)

Description du terrain	k	a
Dégagé	0,68	0,17
Rural avec obstacles au vent	0,52	0,20
Urbain	0,35	0,25
Ville	0,21	0,33

Tableau 15 Constantes dépendants du terrain, [LIDDAMENT, 1996]

D'autres écritures de la loi de puissance existent comme celle développée par le LBL [SHERMAN & GRIMSRUD, 1980] (cf. partie II-1-2). La formulation la plus récente [ASHRAE, 2005] introduit l'épaisseur de la couche limite (voir les valeurs dans le Tableau 16) du vent dans la loi de puissance :

$$v(z) = v_{met} \left(\frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{l_{met}} \left(\frac{H}{\delta} \right)^l \quad (34)$$

Avec

δ_{met}, δ Epaisseur de la couche limite pour, respectivement, la station météorologique et le site (m)

l_{met}, l Exposant caractérisant le terrain, respectivement, de la station météorologique et du site (-)

Enfin, on trouve une expression logarithmique où la vitesse du vent est exprimée en fonction de la hauteur du bâtiment et de la classe de rugosité du terrain [ALLARD & AL., 1998] :

$$\frac{v(z)}{v_{met}} = \frac{v^*(z)}{v_{met}^*} \left[\frac{\ln \frac{z-d}{z_o, z}}{\frac{z_m - d_m}{z_o, m}} \right] \quad (35)$$

Avec

$$\frac{v^*(z)}{v_{met}^*} = \left[\frac{z_o + z}{z_o + m} \right]^{0,1} \quad (36)$$

z_o Hauteur de rugosité du terrain m

$v^*(z)$ Vitesse de friction à l'altitude z m.-1

d Hauteur de déplacement m

Catégorie de terrain	Description	Exposant a	Epaisseur de couche limite δ (m)
1	Centre ville avec 50% des bâtiments de plus de 21 m	0,33	460
2	Terrain urbain, suburbain, forêt, terrain avec obstructions resserrées	0,22	370
3	Terrain dégagé avec obstructions dispersées	0,14	270
4	Terrain plats, sans obstruction	0,1	210

Tableau 16 Caractérisation de la couche limite pour différents types de terrains [ASHRAE, 2005]

Détermination des coefficients de pression C_p

Les coefficients de pression dépendent de la direction du vent, de la forme du bâtiment mais aussi des caractéristiques du site où ce dernier est implanté. Une évaluation précise de ce paramètre s'avère être un des points les plus délicats de la modélisation des mouvements d'air dans les bâtiments. Plusieurs approches peuvent être employées.

L'approche la plus répandue est l'utilisation des bases de données de l'AIVC (Air Infiltration and Ventilation Center) : [ORME & AL., 1994] présentent des valeurs de C_p pour différentes formes, tailles de bâtiments et orientations du vent (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315°). L'utilisation de ces données est largement répandue, notamment par [HENSEN, 1991], [PERSILY & IVY, 2001] et [FEUSTEL & AL., 2005]. Ces bases de données répertorient des valeurs moyennes par façade pour le type de configurations suivantes :

- Grands bâtiment (> 3 étages) :
 - ✓ Rapport largeur/profondeur de 1,5 : 1
 - ✓ Toiture plate
- Petits bâtiments (≤ 3 étages) :
 - ✓ Rapport largeur/profondeur : 2 : 1 et 1 : 1
 - ✓ Toiture présentant une inclinaison : $< 10^\circ$, $11-30^\circ$ ou $> 30^\circ$
 - ✓ Degré d'obstruction du site : « site isolé », « bâtiment entouré d'obstacles correspondant à la moitié de sa hauteur », « bâtiment entouré d'obstacles correspondant à sa hauteur »

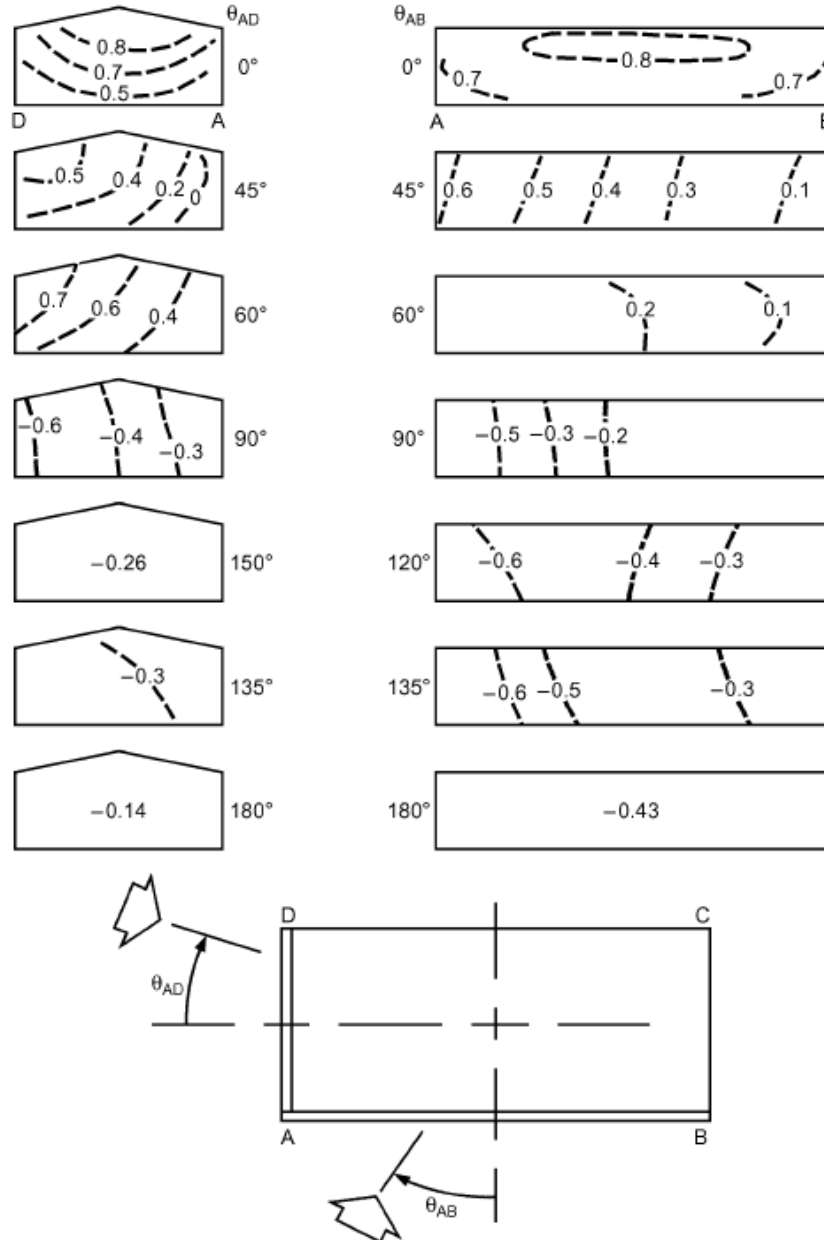


Figure 8 Exemple de distribution de la pression sur un bâtiment [ASHRAE, 2005]

[WALKER & WILSON, 1994] proposent d'ajuster ces données à l'angle d'incidence véritable du vent par la fonction trigonométrique suivante :

$$C_p(\theta) = 1/2[(C_p(0^\circ) + C_p(180^\circ)\cos^2(\theta))^{1/4} + (C_p(0^\circ) - C_p(180^\circ)\cos(\theta))^{3/4} + (C_p(90^\circ) + C_p(270^\circ)\sin^2(\theta))^2 + (C_p(90^\circ) - C_p(270^\circ)\sin(\theta)) \quad (37)$$

Le tableau 15, tiré de [PERSILY & IVY, 2001], représente les coefficients de pression pour une façade en fonction de la direction du vent.

<i>Angle (degrés)</i>	<i>Coefficients de pression</i>	<i>Angle (degrés)</i>	<i>Coefficients de pression</i>
0	0,603	—	—
15	0,562	195	-0,345
30	0,480	210	-0,370
45	0,365	225	-0,494
60	0,183	240	-0,632
75	-0,052	255	-0,592
90	-0,340	270	-0,340
105	-0,592	285	-0,052
120	-0,632	300	0,183
135	-0,494	315	0,356
150	-0,370	330	0,480
165	-0,345	345	0,562
180	-0,452	360	0,603

Tableau 17 Coefficients de pression pour une façade donnée en fonction de l'orientation du vent

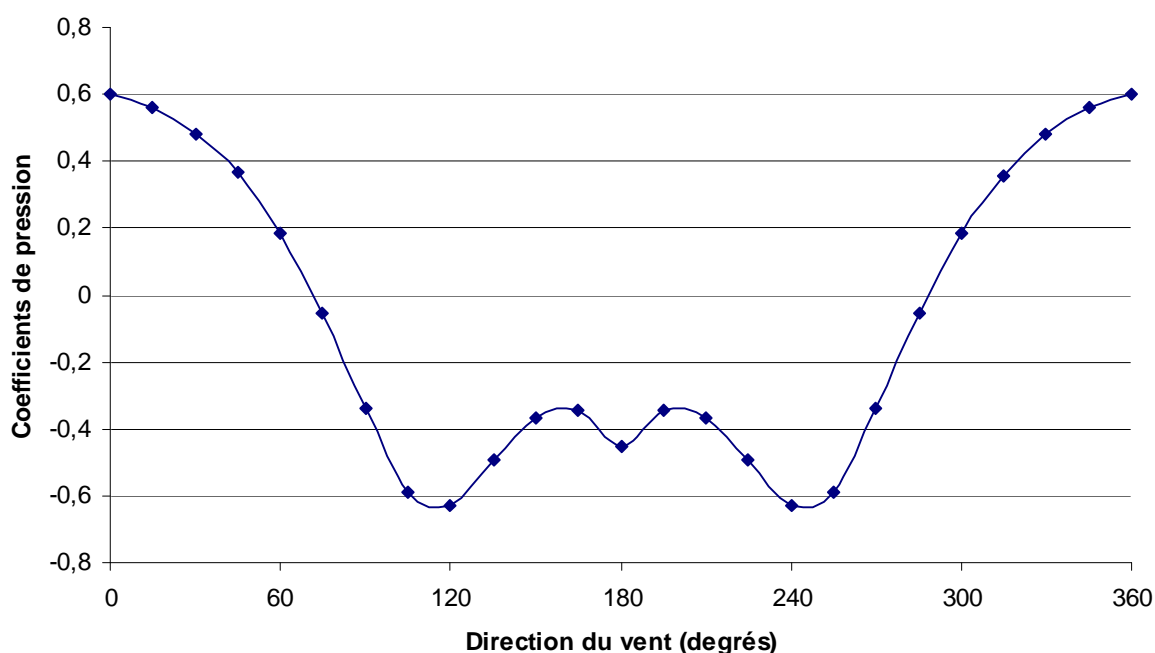


Figure 9 Exemple de distribution de la pression du vent

Il existe également des modèles prédictifs, basés sur des résultats de tests en soufflerie. Les modèles CPCALC+ de [GROSSO & AL., 1995], présent dans COMIS, et Cp-Generator [KNOLL & AL., 1997] permettent de déterminer les coefficients de pression en fonction de plusieurs paramètres.

CPCALC+

Les paramètres liés au climat sont l'exposant de rugosité du terrain α et l'angle d'incidence du vent θ .

La densité de bâti (*pad* pour « plan area density ») et la hauteur relative du bâtiment par rapport aux bâtiments alentours (*rbh* pour « relative building height ») sont les deux paramètres permettant de caractériser le site.

Enfin, le modèle prend en compte la géométrie du bâtiment. Pour chaque façade est déterminé le *far* (frontal aspect ratio) comme le rapport L/H , le *sar* (side aspect ratio) comme le rapport L/H de la façade adjacente. zh et xl sont les positions relatives horizontales et verticales.

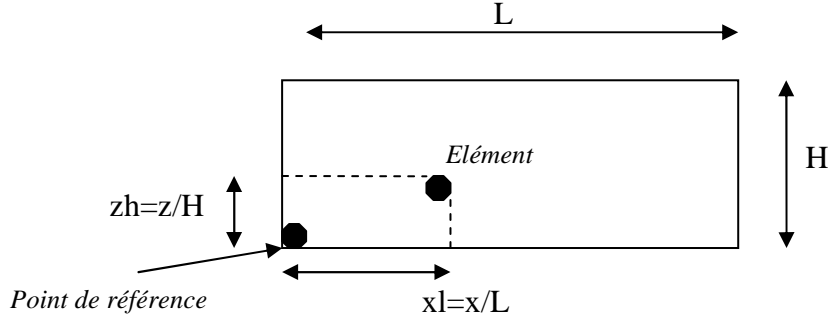


Figure 10 Positionnement d'un élément sur une façade [ALLARD & AL., 1998]

Les profils de référence sont établis à partir d'une expression polynomiale, en fonction de la position verticale (longitudinale pour un toit) relative, pour un élément de surface situé sur un mur s'expriment de la façon suivante :

$$C_{p_{ref}}(zh) = a_0 + a_1 zh + a_2 zh^2 + \dots + a_{n-1} zh^{n-1} + a_n zh^n \quad (38)$$

Avec

- $n = 3$ Dans le cas d'une façade face au vent
- $n = 5$ Dans le cas d'une façade sous le vent
- a_i Coefficients issus de campagnes de mesure

Le coefficient de pression pour l'élément s , de coordonnées zh et xl , s'exprime en fonction des caractéristiques du bâtiment et du site :

$$C_{ps} = C_{p_{ref}}(zh) \times CF \quad (39)$$

Avec

$$CF = C_{f_{zh,\theta}}(\alpha) \times C_{f_{zh}}(pad) \times C_{f_{zh,pad}}(rbh) \times C_{f_{zh,pad}}(far) \times C_{f_{zh,pad}}(sar) \times C_{f_{zh,\theta}}(xl) \quad (40)$$

Et

$$C_{f_{in,im(dt)}} = C_{p_{normin,im,dt}} \quad (41)$$

$$C_{p_{normin,im,dt}} = \frac{C_{p_{in,im(dt)}}}{C_{p_{in,im(dref)}}} \quad (42)$$

$C_{p_{normin,im,dt}}$ correspond à une valeur normée par rapport au profil (α , pad , rbh , far , sar , anw) de référence des tests en soufflerie d'où est tiré le modèle.

Pour plus de précision, l'utilisateur pourra se livrer à une modélisation précise par un code CFD ou à des essais en soufflerie sur des modèles réduits de bâtiments. Ces dernières options se révélant néanmoins fastidieuses au niveau des moyens et du temps à mettre en œuvre.

II-2-3) MODÈLES DE CONNEXIONS AÉRAULIQUES

Les différences de pressions inter-zone connues permettent, via des formulations empiriques ou semi-empiriques, de déterminer les débits d'air inter-zone. Deux types de connexions sont considérés : les petites ouvertures caractérisant les défauts d'étanchéité de l'enveloppe et les grandes ouvertures qui représentent les ouvertures volontaires (entrées d'air, portes, fenêtres).

II-2-3-1) MODÈLES DE FISSURE

Loi de puissance

Tous les modèles de transferts aérauliques des bâtiments recensés par [FEUSTEL & DIERIS, 1992] prennent en compte la modélisation des fissures. En raison de la complexité de la géométrie des fissures, l'écoulement d'air pourra être laminaire et turbulent selon sa localisation. Pour cette raison, il est caractérisé par une loi empirique de puissance :

$$\dot{m}_{i \rightarrow j} = C_m \Delta P^n \quad (43)$$

Avec

$\dot{m}_{i \rightarrow j}$	Débit d'air en de la zone i à la zone j	(kg.s ⁻¹)
C_m	Coefficient caractérisant l'écoulement	(kg.s ⁻¹ .Pa ⁻ⁿ)
n	Exposant caractérisant l'écoulement	(-)

La valeur de C_m est fonction des caractéristiques géométriques de l'ouverture et celle de l'exposant n du type d'écoulement. Un exposant de 0,5 correspond à un écoulement turbulent. Cette valeur approchera 1 dans le cas d'un écoulement laminaire. En pratique, pour un orifice (cf. paragraphe suivant), la valeur de l'exposant sera proche de 0,5. En ce qui concerne les petites ouvertures (de type fissures) la valeur retenue est généralement proche de 0,67 [WALTON, 2006]. [ORME & AL., 1994] fournissent une base de données détaillée issue de campagnes de mesures, pour différents types de composants de bâtiments (liaisons mur-mur, fenêtres, portes...). Ces caractéristiques sont données sous la forme de coefficients C et n.

Les coefficients C et n sont des données évaluées pour des conditions physiques particulières (ρ_0, μ_0, ν_0). Il convient donc de prendre en compte les propriétés réelles de l'air pour le projet étudié. Un facteur de correction est alors nécessaire.

$$\dot{m}_{i \rightarrow j} = K_m C_m \Delta P^n \quad (44)$$

Avec

$$K_m = \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{n-1} \left(\frac{v_0}{v} \right)^{2n-1} \quad (45)$$

K_m	Facteur de correction	(-)
μ	Viscosité dynamique	(kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)
ν	Viscosité cinématique	(m ² .s ⁻¹)

$$\mu = 3,7143 \times 10^{-6} + 4,9286 \times 10^{-8} T \quad (46)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (47)$$

La formulation des débits d'air à travers l'enveloppe d'un bâtiment par la loi de puissance est non seulement la plus répandue dans les modèles de transferts aérauliques mais aussi dans les protocoles de mesure comme la norme [NF EN 13829, 2001] de détermination de la perméabilité à l'air des bâtiments.

Expression quadratique

D'après certains auteurs [BAKER, SHARPLES AND WARD, 1987], l'écoulement à travers les fissures de l'enveloppe est mieux représenté par une loi quadratique liant la différence de pression au débit :

$$\Delta P = A\dot{m} + B\dot{m}^2 \quad (48)$$

Avec

A, B Constantes liées aux caractéristiques géométriques de l'ouverture

Les constantes A et B représentent respectivement les parties laminaire et turbulente de l'écoulement.

$$A = \frac{12\mu z}{\rho L d^3} \quad B = \frac{C}{2\rho d^2 L^2} \quad (49)$$

Avec

d	Largeur de la fissure	(m)
L	Longueur de la fissure	(m)
C	Constante	(-)

Le débit d'air peut ainsi être exprimé en fonction de la différence de pression :

$$\dot{m} = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B\Delta P}}{2B} \quad (50)$$

Si l'expression quadratique semble physiquement plus juste, elle est basée sur la combinaison d'écoulements laminaires et turbulents pleinement développés, hypothèse qui n'est pas vérifiée dans les fissures : leur géométrie est complexe et elles sont soumises aux turbulences du vent autour de l'enveloppe.

III-2-3-2) MODÈLES DE GRANDE OUVERTURE

Loi d'orifice

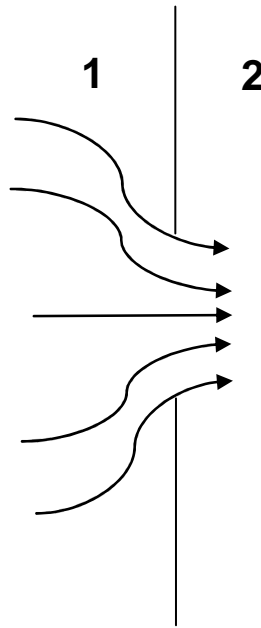


Figure 11 Configuration de l'écoulement à travers un orifice [ALLARD, 1998]

Dans le cas de l'écoulement permanent d'un fluide parfait incompressible, on peut écrire l'équation de Bernoulli pour le cas représenté à la Figure 11 :

$$P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} \quad (51)$$

On suppose les profils des vitesses uniformes de part et d'autre de l'orifice, d'après l'équation de continuité on a :

$$V_1 S_1 = V_2 S_2 = Q_{1 \rightarrow 2} \quad (52)$$

En combinant ces deux équations, on obtient :

$$V_2 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho \left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right)^2}} \quad (53)$$

Dans le cas d'un orifice, on aura $S_2 \ll S_1$. Aussi, comme dans la réalité l'écoulement est soumis aux effets visqueux et à la géométrie de l'ouverture, on introduit un coefficient

empirique de décharge C_d . Une valeur de 0,61 est communément appliquée dans le cas d'une ouverture rectangulaire à bords vifs.

Finalement, la loi d'orifice, permet d'exprimer le débit d'air de la façon suivante :

$$\dot{m}_{i \rightarrow j} = C_d A \sqrt{2 \rho \Delta P} \quad (54)$$

Avec

C_d Coefficient de décharge
 A Surface d'ouverture de l'orifice

Cette loi est adaptée aux petites ouvertures de l'enveloppe, comme les entrées d'air fixes. Elle permet également de caractériser l'écoulement à travers une grande ouverture dans le cas où il n'y a pas de recirculation due à la différence de température entre les deux zones.

Portes et fenêtres ouvertes

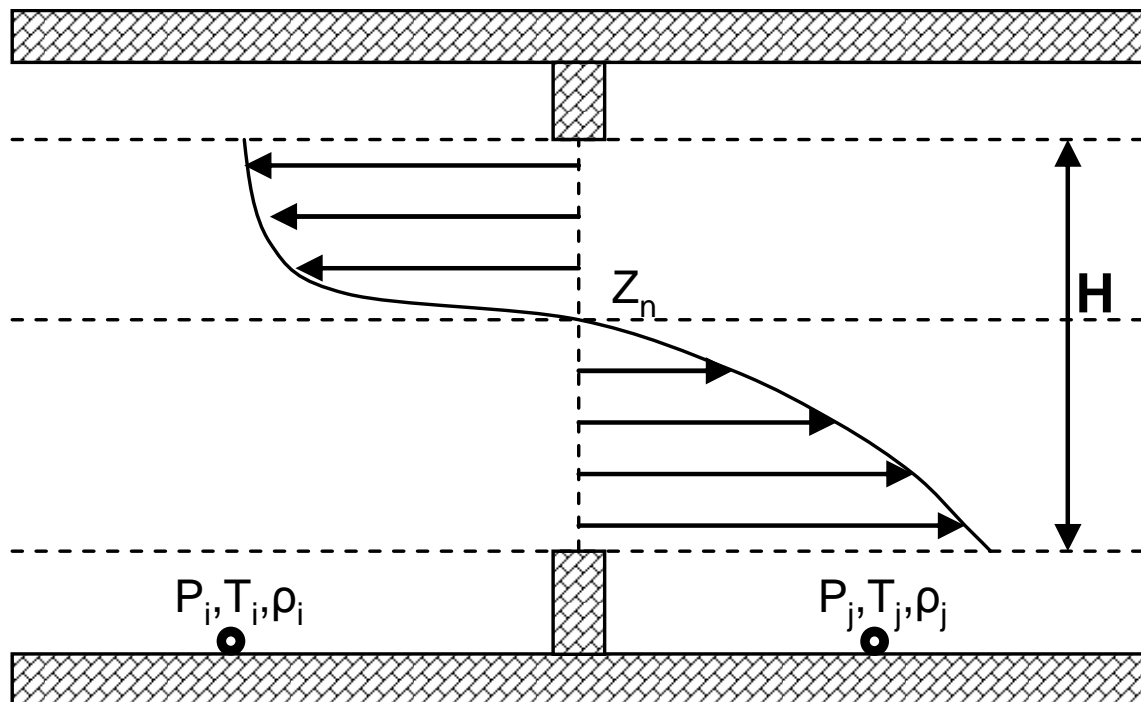


Figure 12 Ecoulement à travers une grande ouverture

Les relations précédentes relient le débit d'air à la différence de pression pour aboutir à un écoulement unique. A travers une grande ouverture, on est en présence de phénomènes physiques variés (écoulements en régimes permanent et turbulent, recirculation de l'air à la couche limite thermique) et l'air peut s'écouler dans plusieurs directions.

[WALTON, 1989] propose de discrétiser l'ouverture en un ensemble d'éléments horizontaux dont le débit d'air est exprimé par la loi d'orifice.

Dans le cas d'une ouverture située entre deux zones i et j, on peut écrire la variation hydrostatique de la pression et relier la vitesse de l'air à la différence de pression de manière analogue à celle du paragraphe précédent :

$$P_i(z) = P_{ouv,i} - \rho_i g z \quad (55)$$

et

$$P_j(z) = P_{ouv,j} - \rho_j g z \quad (56)$$

Avec

$P_{ouv,i}, P_{ouv,j}$ pressions des zones i et j à l'altitude de référence du centre de l'ouverture

$$V_{ij}(z) = \left(\frac{2(P_j(z) - P_i(z))}{\rho} \right)^{1/2} \quad (57)$$

La grande ouverture peut être discrétisée en un ensemble d'éléments de hauteur Δz à travers lesquels le débit d'air s'écoulera selon l'expression :

$$\dot{m}_y = C_d W V_{ij}(z) \Delta z = C_d W \sqrt{2 \rho \Delta P} \Delta z \quad (58)$$

Finalement, dans le cas de l'existence d'un plan neutre à l'altitude Z_n , on peut définir un débit d'air au dessus et en dessous de ce plan neutre par les équations suivantes :

$$\dot{m}_{Z_n, H} = C_d \int_{z=0}^{z=H-Z_n} \rho v_{ij}(z) W dz \quad (59)$$

$$\dot{m}_{0, Z_n} = C_d \int_{z=-Z_n}^{z=0} \rho v_{ij}(z) W dz \quad (60)$$

Plusieurs approches sont proposées pour fournir une solution analytique qui puisse être aisément mise en œuvre dans un modèle multi-zone.

Modèles de Walton

[WALTON, 1989] propose une solution analytique intégrable dans le réseau aéraulique du bâtiment. Cette approche a pour objectif de représenter le débit d'air par un seul élément en calculant au préalable la position du plan neutre. Par définition, il sera situé à l'altitude Z_n pour laquelle $P_i(z) = P_j(z)$ soit :

$$Z_n = \frac{P_{ouv,j} - P_{ouv,i}}{g(\rho_j - \rho_i)} \quad (61)$$

En définissant une nouvelle coordonnée $z' = z - Z_n$, la différence de pression à travers l'ouverture devient :

$$P_i(z') - P_j(z') = -gz'(\rho_i - \rho_j) \quad (62)$$

On peut alors définir deux débits de part et d'autre du plan neutre :

$$\dot{m}_{Z_n, H} = C_d W \int_{z=0}^{z=H/2-Z_n} \rho v_{ij}(z') dz' \quad (63)$$

$$\dot{m}_{Z_n, H} = C_d W \int_{z=H/2-Z_n}^{z=0} \rho v_{ij}(z') dz' \quad (64)$$

Position du plan neutre	$\rho_i - \rho_j > 0$	$\rho_i - \rho_j < 0$
$Z_n \leq H/2$	$\dot{m}_{i \rightarrow j} = -\frac{2}{3} C_d W \sqrt{2\rho_j g \rho_i - \rho_j } \left \frac{H}{2} - Z_n \right ^{3/2} - \left \frac{H}{2} + Z_n \right ^{3/2}$	$\dot{m}_{i \rightarrow j} = \frac{2}{3} C_d W \sqrt{2\rho_i g \rho_i - \rho_j } \left \frac{H}{2} - Z_n \right ^{3/2} - \left \frac{H}{2} + Z_n \right ^{3/2}$
$Z_n \geq H/2$	$\dot{m}_{i \rightarrow j} = \frac{2}{3} C_d W \sqrt{2\rho_i g \rho_i - \rho_j } \left \frac{H}{2} - Z_n \right ^{3/2} - \left \frac{H}{2} + Z_n \right ^{3/2}$	$\dot{m}_{i \rightarrow j} = -\frac{2}{3} C_d W \sqrt{2\rho_j g \rho_i - \rho_j } \left \frac{H}{2} - Z_n \right ^{3/2} - \left \frac{H}{2} + Z_n \right ^{3/2}$
$-H/2 < Z_n < H/2$	$Z_n < H/2$ $\dot{m}_{i \rightarrow j} = -\frac{2}{3} C_d W \sqrt{2\rho_i g \rho_i - \rho_j } \left \frac{H}{2} - Z_n \right ^{3/2}$	$\dot{m}_{i \rightarrow j} = \frac{2}{3} C_d W \sqrt{2\rho_i g \rho_i - \rho_j } \left \frac{H}{2} - Z_n \right ^{3/2}$
	$-H/2 < Z_n$ $\dot{m}_{i \rightarrow j} = \frac{2}{3} C_d W \sqrt{2\rho_i g \rho_i - \rho_j } \left \frac{H}{2} + Z_n \right ^{3/2}$	$\dot{m}_{i \rightarrow j} = -\frac{2}{3} C_d W \sqrt{2\rho_i g \rho_i - \rho_j } \left \frac{H}{2} + Z_n \right ^{3/2}$

Tableau 18 Expression du débit à travers une grande ouverture selon la position du plan neutre

Si l'altitude du plan neutre se situe dans l'ouverture ($-H/2 < Z_n < H/2$) on sera en présence de deux débits opposés de part et d'autre de l'ouverture. Dans les autres cas, un seul débit sera nécessaire. Finalement le Tableau 18 résume les équations possibles pour représenter ces débits.

Dans le cas où le plan neutre est situé dans l'ouverture, on est en présence de deux écoulements. Dans les autres cas, la grande ouverture n'est représentée que par un seul.

Une autre approche consiste en la modélisation d'une grande ouverture d'office par deux ouvertures identiques situées aux $5/18^{\text{ème}}$ et $13/18^{\text{ème}}$ de la hauteur de l'ouverture. Les deux ouvertures sont représentées par des lois d'orifice dans lesquelles la surface vaut la moitié de la surface de l'ouverture.

Modèle COMIS

Dans le cadre du projet COMIS [FEUSTEL & RAYNER-HOSEN, 1990], [ALLARD & UTSUMI, 1992] ont développé un modèle de grande ouverture dédié aux modèles multi-zone.

La masse volumique de l'air présente une stratification linéaire des deux côtés de l'ouverture :

$$\rho_1(z) = \rho_{01} + b_1 z \quad (65)$$

$$\rho_2(z) = \rho_{02} + b_2 z \quad (66)$$

Les effets de la turbulence du vent sont représentés par l'évolution linéaire d'une pression équivalente :

$$P_t(z) = P_{t0} + b_t z \quad (67)$$

La différence de pression entre les deux zones s'écrit finalement :

$$P_1(z) - P_2(z) = P_{01} - P_{02} - g \left[\left(\rho_{01} z + b_1 \frac{z^2}{2} \right) - \left(\rho_{02} z + b_2 \frac{z^2}{2} \right) \right] + P_{t0} + b_t z \quad (68)$$

Cette équation peut avoir jusqu'à deux solutions, deux plans neutre donc. Les débits sont déterminés en intégrant l'expression de la vitesse sur les intervalles délimités par ces plans neutres.

Afin de permettre une solution analytique, on retient le cas particulier pour lequel la masse volumique de l'air est uniforme dans chaque zone ($b_1 = b_2 = 0$). Dans ce cas, comme dans l'approche de Walton, on peut définir deux débits de part et d'autre d'un plan neutre :

$$\dot{m}_{Z_n, H} = \frac{2}{3} W C d \theta \sqrt{\rho} [2g(\rho_{01} - \rho_{02}) - b_t]^{\frac{1}{2}} |H - Z_n|^{\frac{3}{2}} \quad (69)$$

Et :

$$\dot{m}_{0, Z_n} = \frac{2}{3} W C d \theta \sqrt{\rho} [2g(\rho_{01} - \rho_{02}) - b_t]^{\frac{1}{2}} |Z_n|^{\frac{3}{2}} \quad (70)$$

Avec

$$Z_n = \frac{P_{01} - P_{02} + P_{t0}}{g(\rho_{01} - \rho_{02}) - b_t} \quad (71)$$

II-4) L'APPROCHE ZONALE

Les modèles mutli-zone précédemment évoqués permettent d'avoir une idée du comportement de l'écoulement de l'air au sein d'un bâtiment d'un point de vue global. Chaque zone est considérée comme homogène, ses caractéristiques (température, pression, éventuellement concentration de polluants) sont les mêmes en tout point.

Cette approche présente ses limites dès lors que l'on souhaite avoir des informations précises sur l'ambiance (température et vitesse d'air) d'une zone, en particuliers une zone présentant un grand volume (un atrium par exemple).

La méthode multi-zone ne permet pas non plus l'étude du couplage ambiance/systèmes (différence d'ambiance pour un local chauffé par un convecteur ou un plancher chauffant par exemple). Enfin, elle ne permet pas non plus de caractériser les effets de sources localisées de chaleur. Dans le cas d'une source de chaleur dans une pièce de grand volume, l'hypothèse de température homogène s'éloignera un peu plus de la réalité.

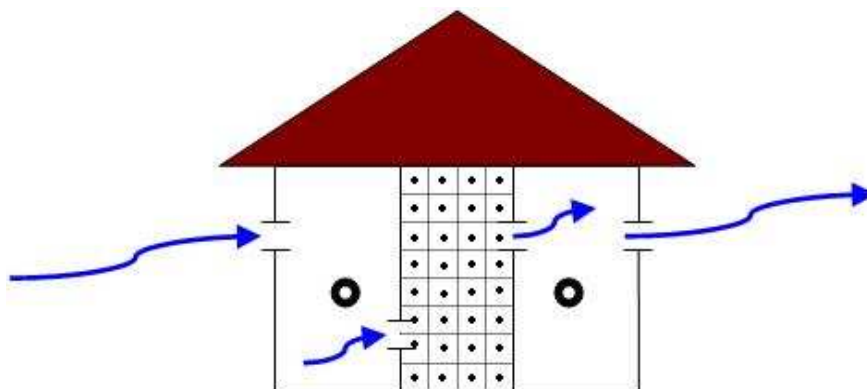


Figure 13 Représentation du problème dans le cas d'une modélisation zonale

La méthode zonale constitue une approche intermédiaire entre la méthode nodale et les codes de champs. Elle consiste en l'étude d'une zone précise, reposant sur son partitionnement en un ensemble de volumes de contrôles parallélépipédiques.

Comme pour la méthode nodale, chaque partition présente des caractéristiques physiques homogènes. Les équations de conservation de la masse et de l'énergie sont appliquées à chaque cellule tout comme les transferts de masse et d'énergie entre celles-ci.

Les modèles en champ de pression ont pour but de déterminer à la fois la distribution des températures et l'allure des écoulements dans un local. Comme dans le cas de l'approche nodale, une loi de puissance permet d'obtenir les débits inter-zones en les reliant à la différence de pression.

Cependant, cette approche repose sur une simplification de la quantité de mouvement et ne permet pas une prédiction précise de la structure de l'écoulement dans les régions où la vitesse d'air est importante. Plusieurs études ont mis en évidence la nécessité de décrire les écoulements dominants par des modèles adaptés [WURTZ & AL., 1999], [WURTZ & AL., 2000] [MUSY & AL., 2001][MORA, 2003].

La partie suivante présente la modélisation d'un local dans une approche zonale. [BOUIA & DALICIEUX, 1991], [INARD & AL., 1996], [WURTZ & AL., 1999], [HAGHIGAT & AL., 2001], [MORA, 2003], [WURTZ & AL., 2006] ont eu l'occasion de mettre en place ce type modèles. La démarche retenue consiste en la distinction de deux types de cellules :

- Cellules courantes : zone à faible amplitude des vitesses ;
- Cellules à écoulement spécifique : jet de paroi horizontal anisotherme, panache thermique issu d'une source de chaleur, couche limite thermique.

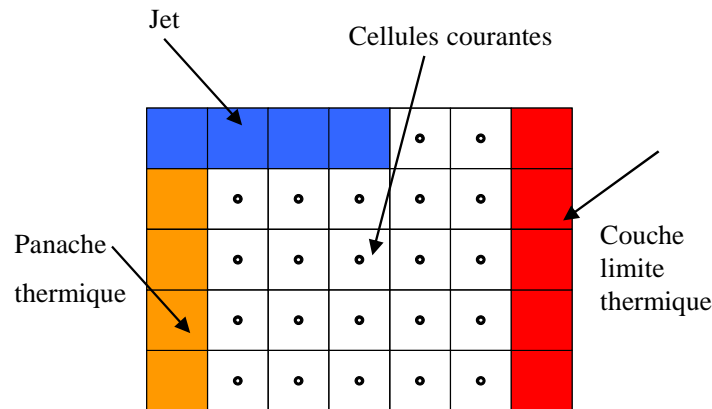


Figure 14 Exemple de représentation du problème dans le cas d'une modélisation zonale (cellules courantes et à écoulement spécifique)

II-4-1) STRUCTURE GÉNÉRALE DU MODÈLE

Le local étudié est découpé en n zones, considérées isothermes et à masse volumique constante. Les zones sont couplées entre elles par des débits massiques d'air. Pour chaque cellule i s'appliquent la conservation de la masse et de l'énergie :

$$\sum_{j=1}^6 \dot{m}_{j \rightarrow i} = 0 \quad (72)$$

Avec

$\dot{m}_{j \rightarrow i}$ Débit massique d'air entre transitant de la cellule j à la cellule i kg.s-1

$$\sum_{j=1}^6 \Phi_{j \rightarrow i} + \Phi_{source} = \rho_i V_i C_p \frac{\partial T_i}{\partial t} \quad (73)$$

Avec

$\Phi_{j \rightarrow i}$	Flux de chaleur entre la cellule j et la cellule i	(W)
Φ_{source}	Source interne de chaleur	(W)
V_i	Volume de la cellule	(m ³)
C_p	Capacité calorifique de l'air	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
T_i	Température de l'air	(K)

II-4-2) CELLULES COURANTES

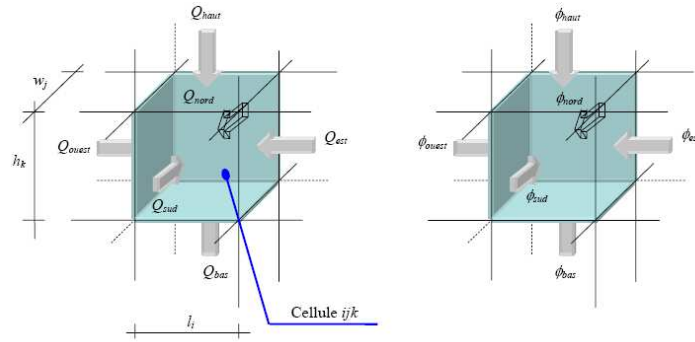


Figure 15 Bilan de masse et conservation d'énergie pour une cellule [BOZONNET, 2005]

Dans une cellule courante, on suppose la pression, la masse volumique et la température de l'air liés par l'équation des gaz parfaits :

$$P_i = \rho_i r T_i \quad (74)$$

Avec

P_i	Pression de référence pour la zone i	(Pa)
ρ_i	Masse volumique de l'air dans la zone i	($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
r	Constante spécifique de l'air sec	($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

Au sein d'une même zone, la pression varie de façon hydrostatique.

Pour les cellules courantes, on fait l'hypothèse que l'amplitude des vitesses d'air, donc la quantité de mouvement, y est faible. Cette hypothèse amène à penser que le débit d'air qui traversera la surface commune à deux cellules dépendra de la différence de pression entre ces deux cellules. Comme pour les méthodes nodales, ce débit est lié de façon non linéaire à la différence de pression statique entre les deux cellules par une loi de puissance selon la formule suivante :

$$\dot{m}_{ij} = \varepsilon_{ij} \rho_{ij} C_d A_{ij} \left(\frac{2|\Delta P_{ij}|}{\rho_{ij}} \right)^{1/2} \quad (75)$$

Avec

$$\Delta P_{ij} = (P_i - \rho_i g h_i) - (P_j - \rho_j g h_j)$$

P_i Pression de référence pour la zone i

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\Delta P_{ij}}{|\Delta P_{ij}|} \text{ quand } \Delta P_{ij} \neq 0$$

ρ_{ij} Masse volumique du fluide amont

A_{ij} Surface de la frontière entre la zone i et la zone j

C_d Coefficient empirique analogue au coefficient de décharge

Pour une connexion verticale entre deux cellules i et j, [INARD & AL., 1997A] proposent la formulation suivante :

$$\dot{m}_{ij} = \varepsilon_{ij} \sqrt{2\rho_j} C d A_{ij} |P_j - P_i|^{1/2} \text{ si } P_j > P_i \quad (76)$$

Dans le cas d'une frontière horizontale, ce débit s'exprime :

$$\dot{m}_{ij} = \varepsilon_{ij} \sqrt{2\rho_j} C d A_{ij} \left| (P_j - P_i) - \frac{1}{2} (\rho_i g h_i + \rho_j g h_j) \right|^{1/2} \text{ si } P_j > P_i \quad (77)$$

On peut alors exprimer le flux de chaleur issu de la cellule j, entrant dans la cellule i par la formule suivante :

$$\Phi_{j \rightarrow i} = \dot{m}_{j \rightarrow i} C_p (T_j - T_i) \quad (78)$$

II-4-3) CELLULES À ÉCOULEMENT SPÉCIFIQUE

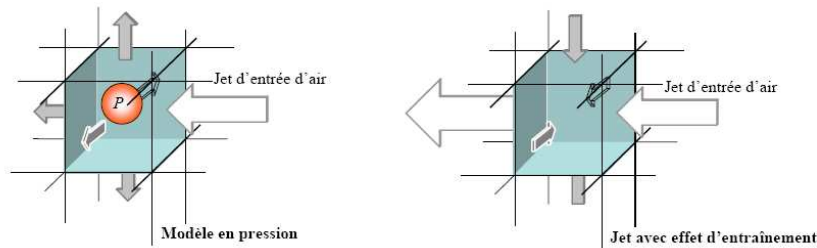


Figure 16 Représentation des débits sortant d'une cellule avec un jet imposé sur l'une des interfaces [BOZONNET, 2005]

Dans le cas des cellules courantes, la pression imposée en entrée sur le volume de contrôle par un écoulement dominant sera ensuite répartie de la même façon sur toutes les faces de ce volume alors que l'énergie cinétique a tendance à se propager en grande partie dans la direction du jet. Pour pallier ce problème, les débits d'air dans les zones affectées par les écoulements dominants sont représentés par des modèles empiriques.

II-4-3-1) MODÈLE DE JET DE PAROI

Dans cette partie, on présente le modèle de jet de paroi isotherme de [RAJARATNAM, 1976] (vu dans [MORA, 2003]).

Le profil de vitesse longitudinal d'un jet en fonction de la distance y à sa paroi s'écrit :

$$U = U_m \left(-0,937 \left(\frac{y}{b_u} - 0,14 \right)^2 \right) \text{ si } P_j > P_i \quad (79)$$

Avec

U_m	Amplitude de la vitesse	(m.s ⁻¹)
y	Distance normale par rapport à la paroi	(m)

L'amplitude de la vitesse du jet varie en fonction de la distance à l'origine du jet selon l'expression :

Avec

U_0	Module de la vitesse au niveau du diffuseur	(m.s ⁻¹)
h	Dimension transversale du diffuseur	(m)
x	Distance par rapport à l'origine du jet	(m)

$$b_{\prime\prime} = 0,068(x - 10h) \quad (81)$$

Le modèle présenté ici est celui de [INARD & AL., 1997B], issu de travaux sur le panache thermique des convecteurs électriques. Ce modèle est également utilisé par [WURTZ & AL., 2000].

$$q = \frac{\sqrt{\pi}}{\gamma} \rho_0 U_m b u \quad (82)$$

On obtient l'épaisseur dynamique du panache par la relation suivante :

bu	Épaisseur de panache	(m)
E_0	Coefficient d'entraînement du panache au niveau de la paroi	(-)
St	Nombre de Stanton ($Nu/(RaPr)$)	(-)
λ	Rapport largeur thermique/largeur dynamique du panache	(-)

z Ordonnée du point d'étude (m)

z_0 Ordonnée de l'origine fictive du panache (m)

La vitesse maximale de l'air pour une sous interface sera :

$$Um = \left(\frac{6\lambda(1 + \lambda^2)^{1/2}}{3\lambda(Cf + \sqrt{2}E_0) - (2(1 + \lambda^2))^{1/2}St} \right)^{1/3} \left(\frac{\phi g \beta}{\rho_0 Cp_0} \right)^{1/3} \quad (84)$$

Avec

λ Rapport largeur thermique/largeur dynamique du panache (-)

E_0 Coefficient d'entraînement du panache au niveau de la paroi (-)

St Nombre de Stanton ($Nu/(RaPr)$) (-)

Cf Coefficient de frottement à l'interface air paroi ($W.m^{-2}.K^{-(n+1)}$)

ϕ Flux linéique dans le panache au centre de la cellule ($W.m^{-1}$)

g Accélération de la pesanteur ($m.s^{-2}$)

β Coefficient d'expansion volumique de l'air (K^{-1})

ρ_0 Masse volumique de l'air en dehors du panache ($kg.m^{-3}$)

Cp_0 Capacité thermique massique de l'air ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)

II-4-4) DESCRIPTION DE L'ENVELOPPE

Le but des modèles zonaux est d'étudier l'ambiance d'un local, les connexions aérauliques entre locaux sont traitées comme au paragraphe II-2-3 (grandes ouvertures et fissures).

Finalement, on prendra en compte le débit d'infiltrations d'air comme une entrée du modèle (un débit au niveau de la paroi) qui servira à caractériser l'ambiance.

Ainsi, dans le cas où le volume de contrôle se trouve aux abords d'une paroi, on ajoute un terme lié à l'échange convectif avec la paroi. Aussi, le débit $\dot{m}_{i \rightarrow j}$ représente ici un débit d'infiltration d'air.

$$\Phi_{i \rightarrow j} = \dot{m}_{i \rightarrow j} Cp(T_i - T_j) + h_{conv} S(T_s - T_j) \quad (85)$$

Avec

h_{conv} Coefficient de convection surfacique ($W.m^{-2}.K^{-1}$)

S Surface de paroi (m^2)

T_s Température de paroi (K)

II-5) LES CFD

Une dernière approche existe pour caractériser les mouvements d'air dans les bâtiments, il s'agit de la méthode dite des codes de champs ou CFD (Computational Fluid Dynamics). On parle d'approche microscopique de la modélisation de la ventilation. Le comportement de l'ambiance du local étudié y est caractérisé par ses variables fondamentales pour chaque volume de contrôle :

- ✓ La vitesse (à travers ses composantes V_x , V_y et V_z) ;
- ✓ La pression ;
- ✓ La température.

Les logiciels CFD sont basés sur la résolution des équations de Navier-Stokes (équations de la conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement). Ils permettent de décrire avec précision l'allure de l'écoulement, même dans le cas où celui-ci est soumis à des écoulements dominants (jets, panache thermique...).

Pour un écoulement de fluide incompressible, satisfaisant aux hypothèses de Boussinesq (petits écarts de température et de pression, et variations de la masse essentiellement dues à la température), les équations résolues au niveau des volumes de contrôle représentant le bâtiment sont les suivantes :

- ✓ Conservation de la masse

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (86)$$

- ✓ Conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right\} - \beta(T - T_0)g \quad (87)$$

- ✓ Conservation de l'énergie

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right\} + H_s \quad (88)$$

Avec

x_i	Coordonnées cartésiennes	
U_i	Composante de la vitesse instantannée dans la direction x_i	(m.s ⁻¹)
P	Pression statique instantanée	(Pa)
T, T_0	Températures instantanée et de référence	(K)
ν	Viscosité cinématique	(m ² .s ⁻¹)
t	Temps	(s)

β	Coefficient d'expansion volumique	(K ⁻¹)
ρ	Masse volumique du fluide	(kg.m ⁻³)
λ	Conductivité thermique	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
H_s	Source volumique de chaleur	(W)

[MORA, 2003] recense les différentes techniques de résolution CFD : la simulation numérique directe ou DNS (Direct Numerical Simulation), la simulation des grandes structures tourbillonnaires ou LES (Large-Eddy Simulation) et la simulation par des modèles de transport des quantités moyennées en temps ou RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes).

Le local étudié est discrétisé en plusieurs dizaines de milliers de volumes de contrôle, le temps de calcul et les ressources informatiques nécessaires pour arriver à la résolution du problème par la méthode des éléments finis ou des volumes finis pour une étude sur une durée très courte peuvent être très importants (parfois plusieurs heures).

Enfin, les données d'entrées (positionnement des entrées d'air, type d'écoulement en entrée, description des sources de chaleur, obstacles, etc.) pré-supposent un stade très avancé dans la conception du bâtiment et une compréhension poussée des phénomènes physiques de la part de l'utilisateur.

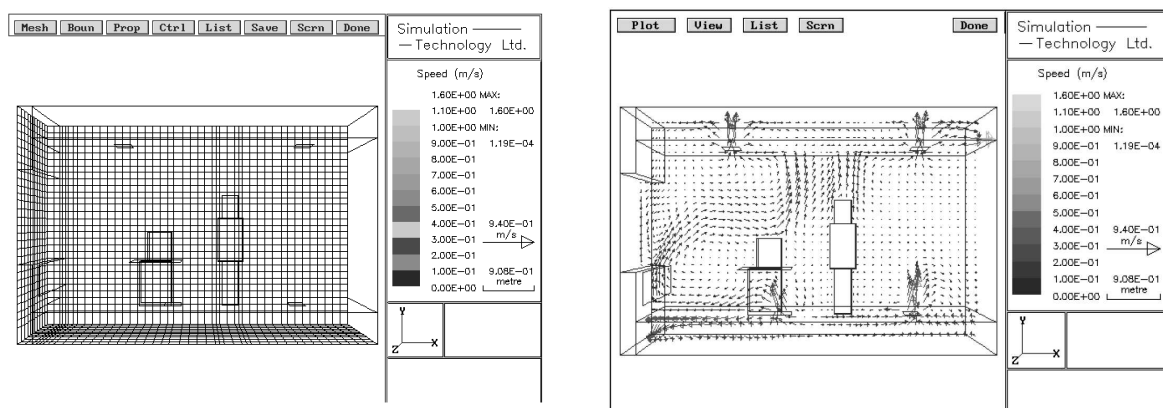


Figure 17 Exemple de discrétisation d'un local (figure de gauche) et de distribution du champ des vitesses (figure de droite), [LIDDAMENT, 1996]

II-6) CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a présenté les différentes techniques de modélisation aéraulique des bâtiments, de la plus simple à la plus détaillée. Ces techniques servent de base à l'outil de simulation développé et décrit dans le chapitre suivant. Elles seront adaptées aux problématiques de conception auxquelles souhaite répondre ce travail de thèse.

CHAPITRE III

MODÈLE AÉRAULIQUE : DÉVELOPPEMENT ET COUPLAGE AVEC UN OUTIL DE SIMULATION THERMIQUE

Dans ce chapitre, on fixe les principes (généraux puis spécifiques) du modèle de simulation aéraulique qui est développé. Le couplage avec l'outil de simulation thermique est ensuite détaillé. Les aspects relatifs à la résolution numérique (tant pour le modèle aéraulique seul que pour le couplage) sont ensuite explicités.

Enfin, plusieurs éléments de validation (comparaison avec des solutions analytiques, comparaison inter-logicielle) sont présentés.

III-1) SÉLECTION D'UN MODELE

III-1-1) CHOIX DES PRINCIPES GÉNÉRAUX

Le modèle présenté dans cette partie a pour objectif de quantifier les déperditions énergétiques dues aux apports d'air non maîtrisés dans le bâtiment et le potentiel de rafraîchissement lié à la ventilation naturelle. Un tel modèle doit être capable de quantifier les débits d'air transitant par l'enveloppe et ce pour les différentes zones, caractérisées par leur température, prises en compte par le modèle thermique. Il doit aussi proposer une méthode de distribution des défauts d'étanchéité de l'enveloppe. Enfin, les transferts aérauliques étant liés aux transferts thermiques (et réciproquement), une méthode de couplage entre les deux modèles doit être mise en œuvre.

Comme on l'a vu dans la partie précédente, le modélisateur dispose d'une multitude d'outils pour caractériser les mouvements d'air dans le bâtiment. Les plus simples sont les modèles mono-zone, qu'ils soient empiriques ou détaillés, mais ils ne permettent pas de prendre en compte la complexité du bâtiment, notamment les différences de températures qui peuvent exister entre ses zones.

Les modèles multi-zone présentent l'avantage de prendre en compte cette hétérogénéité interne du bâtiment en le considérant comme un réseau de zones à caractéristiques physiques homogènes. Ces modèles sont adaptés à l'étude des transferts aérauliques dans les bâtiments.

Ils sont tout particulièrement adaptés à l'étude du renouvellement d'air, [BOJIC & COSTIC, 2006] et [KHOUKHI & AL., 2007] ont par exemple utilisé cette approche pour quantifier le renouvellement d'air par ventilation naturelle dans des bâtiments résidentiels.

Ces modèles sont également utilisés pour dimensionner des installations de ventilation. [WILLENS & JANSSENS, 2005] utilisent COMIS pour évaluer l'influence de la présence d'entrées d'air auto-réglables sur les performances d'un système de ventilation. Le même logiciel a été utilisé pour confronter la performance de différents systèmes de ventilation en fonction des variations climatiques annuelles [BLOMSTERBERG & AL., 1999].

Enfin, quelques travaux ont consisté en un couplage de ces modèles avec des modèles thermiques multi-zone. [WEBER & AL., 2003] proposent de coupler COMIS à TRNSYS, [KOANAKIS, 2005] et [JREIJRY & AL., 2007] ont également développé des modèles thermo-aérauliques en couplant transferts thermique et aérauliques à chaque pas de temps pour évaluer des stratégies de ventilation naturelle et hybride.

L'approche zonale permet de prendre en compte la diversité des caractéristiques physiques au sein d'une même zone. Ce type de méthode s'avère particulièrement intéressante pour l'étude de la stratification thermique dans un local de grand volume. Les travaux de [WURTZ & AL., 1999] ont permis d'aboutir à une évaluation pertinente de l'écoulement de l'air et de la distribution de température dans des locaux de géométrie rectangulaire simple. Cette méthode a aussi été mise en œuvre par [VOELTZEL & AL., 2001] pour l'étude de l'ambiance thermique dans un atrium.

La confrontation du modèle zonal de [INARD & AL., 1997A] à des données expérimentales pour des locaux mono-zone, un local bizonne et un atrium soumis à des écoulements de convection mixte a également permis de montrer la pertinence de l'approche au niveau de l'étude du confort thermique dans ce type de local.

Ce type d'approche se révèle particulièrement intéressant dans le cadre de l'étude du couplage ambiance/systèmes. [MEGRI & AL., 2005] recensent les différentes études ayant permis d'intégrer des systèmes de ventilation et chauffage dans les modèles zonaux. Les conclusions des travaux menés sur les modèles d'émetteur de chaleur ont notamment permis d'émettre des recommandations techniques aux fabricants et concepteurs de tels produits.

Cependant, la mise en œuvre de ces modèles nécessite la connaissance des écoulements dominants dans le local, écoulements qui seront caractérisés par des lois empiriques. Cette condition limite donc l'utilisation de ces modèles à une géométrie simple.

Enfin, les outils CFD permettent d'évaluer avec précision les champs de température et de vitesse en résolvant les équations de Navier-Stokes. Cette approche s'avère particulièrement intéressante pour l'étude de problèmes ponctuels et sur une courte durée. [BARHOUN, 2006] utilise notamment ces outils pour caractériser les transferts thermiques dans les défauts d'étanchéité de l'enveloppe. [REGARD, 1996] a appliqué les codes de champs à l'étude de l'écoulement de l'air à travers les grandes ouvertures d'un bâtiment. Les lois empiriques utilisées pour représenter les connexions dans les modèles en réseau sont souvent issues d'une série de calculs par CFD. Cette approche est également pertinente dans le cas de l'étude d'une pièce [MORA, 2003].

Le temps de calcul et la complexité de la description du problème (localisation des systèmes de chauffage et de ventilation notamment) ne permettent pas actuellement à ces outils de simuler un bâtiment entier sur une période annuelle.

Dans ce chapitre, on décide donc de mettre en place un modèle aéraulique multi-zone, qui devra être couplé avec le modèle thermique. Les deux modèles ont un niveau de granularité équivalent (zones considérées à température et à pression homogène), ce qui justifie également ce choix. Il s'agit maintenant de choisir les éléments qui seront retenus pour répondre à l'objectif de mieux prendre en compte le renouvellement d'air dans le calcul des besoins de chauffage du bâtiment.

III-1-2) CHOIX SPÉCIFIQUES

Les principes généraux du modèle ainsi établis, il reste à choisir les types de connexions aérauliques qui seront prises en compte. L'objectif est ici d'évaluer plus finement les origines du renouvellement d'air du bâtiment pour affiner la prédiction de ses performances énergétiques. On choisit donc, pour l'instant, une bibliothèque de composants permettant de caractériser son enveloppe et les débits inter-zones. Cette bibliothèque pourra être complétée pour évaluer d'autres problématiques liées au renouvellement d'air en intégrant, par exemple, des composants de ventilation naturelle.

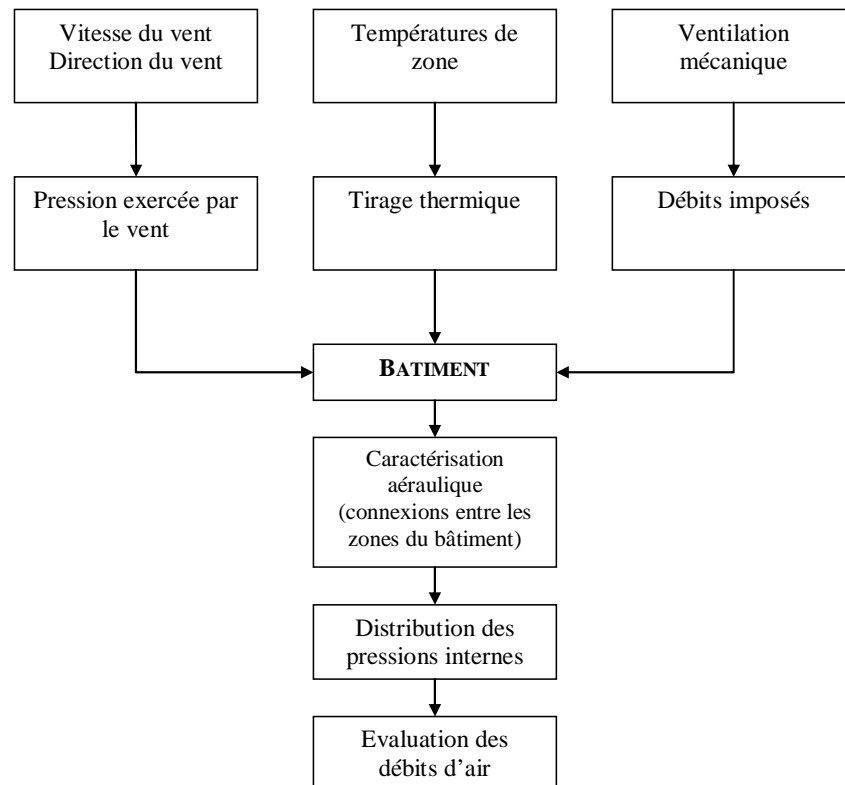


Figure 18 Structure du modèle aéraulique

III-1-2-1) DÉFAUTS D'ÉTANCHÉITÉ DE L'ENVELOPPE

Pour représenter les défauts d'étanchéité de l'enveloppe, on choisit la loi de puissance pour ses qualités physiques et pratiques.

D'une part, cette relation liant le débit à la différence de pression a été de nombreuses fois validée expérimentalement par des études sur sites et en laboratoire ; aussi, la comparaison entre les résultats obtenus par cette dernière et la relation quadratique montre des résultats identiques [KULA & SHARPLES, 1994] et [WALKER, WILSON & SHERMAN, 1997].

D'autre part elle est l'expression adoptée par l'industrie du bâtiment, elle est utilisée dans le cadre des tests de pressurisation par porte soufflante et dans les normes de calculs de ventilation.

Enfin, les bases de données de perméabilité à l'air des composants de l'enveloppe, disponibles sous forme de coefficients C (exprimé en $\text{dm}^3.\text{s}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{Pa}^{-n}$ ou en $\text{dm}^3.\text{s}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{Pa}^{-n}$) et d'exposants n ou de surfaces équivalentes de fuite (m^2), nécessitent une adaptation de cette loi de puissance.

Dans le cas des données répertoriées par [ORME & AL., 1994], l'expression liant le débit d'air à la différence de pression s'écrit :

$$\dot{m}_{i \rightarrow j} = 0,001 \sqrt{\rho} K_m L C_L \Delta P^n \quad (89)$$

Ou :

$$\dot{m}_{i \rightarrow j} = 0,001 \sqrt{\rho} K_m S C_S \Delta P^n \quad (90)$$

Avec

L	Longueur du composant	(m)
S	Surface du composant	(m^2)
C_L	Coefficient caractéristique de l'écoulement	($\text{dm}^3.\text{s}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{Pa}^{-n}$)
C_S	Coefficient caractéristique de l'écoulement	($\text{dm}^3.\text{s}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{Pa}^{-n}$)

Les données répertoriées par l'ASHRAE sont représentées sous la forme d'une surface équivalente de fuite sous 4 Pa (ELA_4). On peut réarranger la loi de puissance en incluant la surface équivalente de fuite de la façon suivante :

$$\dot{m}_{i \rightarrow j} = \sqrt{\rho} K_m C_m \Delta P^n \quad (91)$$

Avec :

$$C_m = 4^{1/2-n} ELA_4 \sqrt{2} \quad (92)$$

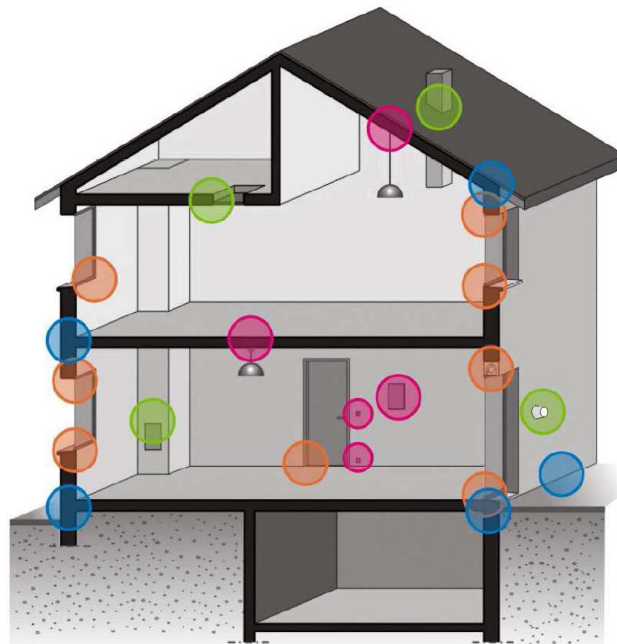


Figure 19 Principaux points de fuites de l'enveloppe [CARRIE & AL., 2006]

Ces bases de données permettent de disposer de valeurs par défaut pour les caractéristiques de perméabilité à l'air des principaux points de fuite de l'enveloppe :

- ✓ Fenêtres ;
- ✓ Portes ;
- ✓ Interfaces mur / composant (par exemple joint de fenêtre) ;
- ✓ Perméabilité des murs, plancher bas et plancher haut ;
- ✓ Liaisons mur-plancher bas, mur-plancher intermédiaire et mur-plancher haut ;
- ✓ Liaisons mur-mur ;
- ✓ Canalisations ;
- ✓ Couvertures de toit ;
- ✓ Cheminées.

Par exemple, le Tableau 19 donne les valeurs caractéristiques pour une interface mur-menuiserie selon que son joint présente un calfeutrement. La valeur médiane sera utilisée pour décrire un composant en bonne condition, celle du premier quartile sera utilisée si un soin particulier a été porté lors de la mise en œuvre, la valeur du 3^e quartile pourra être utilisée pour décrire un composant endommagé.

Données exprimées par m linéaire de joints	1 ^{er} Quartile		Médiane		3 ^e Quartile	
	dm ³ .s ⁻¹ .m ⁻¹ .Pa ⁻ⁿ					
	C	(n)	C	(n)	C	(n)
Joint calfeutré	3,3.10 ⁻⁴	(0,6)	2,5.10 ⁻³	(0,6)	0,012	(0,6)
Joint non calfeutré	0,053	(0,6)	0,061	(0,6)	0,067	(0,6)

Tableau 19 Caractéristiques aérauliques d'une liaison mur-fenêtre

III-1-2-2) RÉALISATION VIRTUELLE D'UN TEST DE PORTE SOUFFLANTE

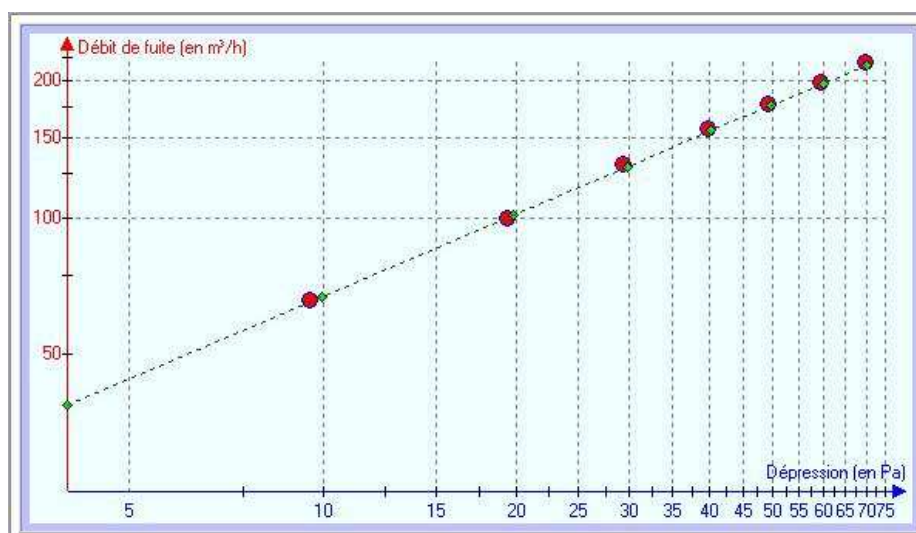


Figure 20 Exemple de courbe caractéristique débit/dépression d'un logement

Dans le cas où le degré d'étanchéité n'est pas connu, il est possible de réaliser un test de porte soufflante virtuel.

Dans la réalité, le déroulement d'un test de pressurisation s'effectue dans le cadre d'une procédure normalisée [NF EN 13829, 2001]. Ce test consiste en une extraction de volumes

d'air connus à l'aide d'une porte soufflante (cf. Figure 21) en mesurant simultanément les différences de pression entre l'intérieur et l'extérieur afin d'obtenir une série de couples "Débit/Dépression". Une régression linéaire de ces couples permet d'obtenir le débit de fuite de l'enveloppe à la pression souhaitée (par exemple 4 ou 50 Pa, cf. Figure 20).

Pour déterminer la perméabilité de l'enveloppe d'un bâtiment, les ouvertures volontaires de l'enveloppe (fenêtres, portes, portes coupe-feu) doivent être scellées, les ouvertures réglables doivent être fermées et les bouches d'air de ventilation obturées.

Les portes de communication intérieures doivent en outre rester ouvertes de façon à ce que la pression du bâtiment testé se maintienne de manière uniforme dans une plage inférieure à 10 % de la différence de pression mesurée entre l'intérieur et l'extérieur.



Figure 21 Porte soufflante⁵

Les résultats des tests de pressurisation sont soumis à plusieurs incertitudes. Les pressions exercées par le vent et le tirage thermique influent sur les résultats. La norme préconise ainsi un produit de la différence de température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur par la hauteur du bâtiment inférieur à 500 m.K. La vitesse du vent doit être inférieure à 6 m.s⁻¹.

Dans le modèle, la réalisation de ce test revient à faire une simulation statique où les hypothèses correspondent aux conditions idéales de bon déroulement du test [WALTON & DOLS, 2006] :

- ✓ Modélisation monozone du bâtiment ;
- ✓ Vitesse du vent fixée à 0 m.s⁻¹ ;
- ✓ Pression extérieure fixe ;
- ✓ Températures intérieures et extérieures fixées à 20 °C ;
- ✓ Pression de la zone étudiée fixée à la pression de référence souhaitée (la plupart du temps +50 Pa ou +4 Pa) par rapport à l'extérieur ;
- ✓ Non prise en compte des entrées d'air volontaires et des débits de ventilation.

⁵ <http://www.blowerdoor.de>

III-1-2-3) MÉTHODE POUR LA DISTRIBUTION DES INFILTRATIONS EN FONCTION D'UNE MESURE

Le modèle mis en oeuvre permet d'approximer les débits d'air transitant par les défauts d'étanchéité de l'enveloppe. Ces défauts sont principalement dus à des difficultés de mise en oeuvre, aux différentes liaisons et aux composants utilisés. Il est donc délicat de représenter judicieusement leur distribution lors de l'étude d'un bâtiment.

Dans le cas où la perméabilité globale de l'enveloppe n'est pas connue, on distribuera les défauts d'étanchéité de l'enveloppe en utilisant les valeurs par défaut fournies par les bases de données existantes.

Pour un bâtiment existant ayant subi un test d'étanchéité à l'air, [HAGHIGHAT, 2003] a développé une méthode pour corriger les données de l'AIVC avec les résultats du test. Partant du principe que l'exposant caractéristique de l'écoulement de l'élément i correspond à la valeur indiquée dans les bases de données, on peut déduire le coefficient caractéristique C_{Q_i} lié à la géométrie de l'écoulement grâce à la formule suivante :

$$\frac{\sum C_{Q_{i,lit}} (\Delta P)^{n_{i,lit}}}{C_{Q_{test}} (\Delta P)^{n_{test}}} = \frac{C_{Q_{i,lit}}}{C_{Q_i}} \quad (93)$$

Le coefficient de l'écoulement i peut alors s'exprimer :

$$C_{Q_i} = C_{Q_{i,lit}} \times \frac{[C_{Q_{test}} (\Delta P)^{n_{test}}]}{\sum C_{Q_{i,lit}} (\Delta P)^{n_{i,lit}}} \quad (94)$$

Pour un bâtiment neuf, dans le cas où il y a engagement de performances, le modélisateur disposera de la valeur globale de la perméabilité l'air du bâtiment étudié. Pour obtenir le label PassivHaus par exemple, le bâtiment doit présenter une perméabilité à l'air au maximum égale à $0,6 \text{ vol.h}^{-1}$ sous 50 Pa. Cette valeur pourra être retenue pour la modélisation du bâtiment et on pourra ainsi appliquer cette approche.

La valeur globale de la perméabilité de l'enveloppe peut être renseignée via les deux indicateurs les plus utilisés en France. Quand la référence de la normalisation est le volume chauffé du bâtiment, le taux de renouvellement d'air par infiltrations exprimé en volume par heure (noté ACH pour Air Changes per Hour ou n) est fonction d'une différence de pression donnée.

$$ACH_{50} = n_{50} = V_{f50} / V_c \quad (95)$$

Avec :

ACH_{50} ou n_{50}	Taux de renouvellement d'air sous 50 Pa	(h^{-1})
V_{f50}	Débit de fuite sous 50 Pa	$(\text{m}^3.\text{h}^{-1})$
V_c	Volume chauffé	(m^3)

L'indice de perméabilité à l'air, correspondant à l'approche réglementaire française [RÉGLEMENTATION THERMIQUE, 2005] représente la fuite d'air sous 4 Pa par rapport à la surface des parois déperditives (le plancher bas est exclu de cette surface).

$$I_4 = V_{f4} / A_{Tbat} \quad (96)$$

Avec :

I_4	Indice de perméabilité à l'air sous 4 Pa en	$(m^3.h^{-1}.m^2)$
V_{f4}	Débit de fuite sous 4 Pa en	$(m^3.h^{-1})$
A_{Tbat}	Surfaces de parois déperditives en	(m^2)

Les débits de fuites dans les équations (95) et (96) correspondent au terme $C_{Q_{test}}(\Delta P)^{n_{test}}$ de l'équation (94).

III-1-2-4) ENTRÉES D'AIR

Pour les entrées d'air fixes, dans le cas d'un bâtiment existant par exemple, l'utilisation de la loi d'orifice est la plus communément employée. La donnée d'entrée est la surface d'ouverture de l'entrée d'air.

Si on dispose de conditions de fonctionnement de référence $(\rho_0, Q_0, \Delta P_0)$ fournies par le fabricant, on peut ajuster cette loi en fonction de ces conditions :

$$\dot{m} = \rho_0 Q_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{0,5} \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0} \right)^{0,5} \quad (97)$$

Dans les bâtiments neufs, les entrées d'air sont auto-réglables. Elles présentent une ouverture dont la section de passage varie et permettent de limiter l'entrée de l'air lorsque la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment atteint une valeur seuil (20 Pa en France, 10 Pa aux Pays-Bas par exemple), correspondant à un vent trop fort.

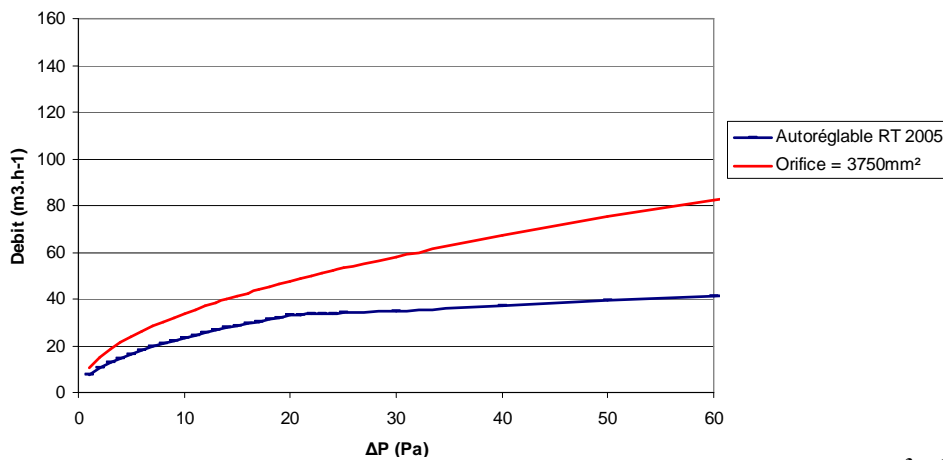


Figure 22 Courbes caractéristiques d'entrées d'air fixe et autoréglable ($M=30m^3.h^{-1}$)

On distingue deux types d'entrées d'air autoréglables, les entrées passives et les entrées actives. Les entrées actives sont régulées par un moteur. On considère ici des entrées passives dont la courbe caractéristique est décrite par l'équation(12) du modèle de la réglementation thermique.

III-1-2-5) VENTILATION MÉCANIQUE

Pour modéliser les ventilateurs, on retient une valeur de débit d'air extrait ou soufflé pour chaque zone comme une donnée constante saisie par l'utilisateur :

$$\dot{m} = k \quad (98)$$

Avec

k constante définissant le débit en (m³.h⁻¹)

Cette donnée d'entrée devra refléter le strict débit correspondant au renouvellement d'air hygiénique souhaité. L'étude du renouvellement d'air par infiltrations à travers l'enveloppe ou par ouverture de portes et fenêtres est traitée grâce aux autres composants présentés ici.

III-1-2-6) GRANDES OUVERTURES

En ce qui concerne la modélisation des grandes ouvertures, on a vu dans le paragraphe III-2-3-2 que les solutions analytiques destinées à être incorporées dans un réseau de connexions aérauliques reposent sur le même principe. L'air transitant par l'ouverture est représenté par un ou deux débits suivant la position de l'axe neutre de l'ouverture. On retient donc cette approche en considérant la connexion entre deux zones isothermes.

Définition du coefficient de décharge

[FEUSTEL & AL., 2005] répertorient les relations empiriques permettant de calculer le coefficient de décharge.

Dans le cas d'une porte intérieure, celui-ci varie en fonction du rapport entre la hauteur de la porte et la hauteur de la pièce selon la relation :

$$C_d = 0,609 \frac{H}{H_r} - 0,066 \quad (99)$$

$$0,2 < \frac{H}{H_r} < 0,9 \quad (100)$$

Avec

H	Hauteur de la porte	(m)
H_r	Hauteur de la pièce	(m)

Pour une porte extérieure, dans le cas d'une ventilation à simple exposition, la relation suivante est proposée :

$$C_d = 0,08 \left(\frac{gH^3 \Delta T}{T_m U^2 D^2} \right)^{-0,38} \quad (101)$$

Avec

ΔT	Différence de température entre l'intérieur et l'extérieur	(K)
T_m	Température de la pièce	(K)
U	Vitesse du vent	(m.s ⁻¹)
D	Profondeur de la pièce	(m)

Enfin, dans le cas d'une fenêtre pivotant autour d'un axe horizontal, en considérant un angle d'ouverture α (en degrés), et le rapport entre la hauteur h et la largeur l de la fenêtre l'expression du coefficient de décharge est :

$$C_d = 0,0147\alpha - 0,0928 \frac{h}{l} + 0,4116 \quad (102)$$

Scénario d'ouverture

Comme la consigne de température ou le renouvellement d'air, on affecte un scénario de fonctionnement horo-journalier aux grandes ouvertures. La Figure 23 présente un exemple de scénario estival donnant le pourcentage d'ouverture de fenêtre pour la zone considérée.

%Ouverture	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0h	100	100	100	100	100	100	100
1h	100	100	100	100	100	100	100
2h	100	100	100	100	100	100	100
3h	100	100	100	100	100	100	100
4h	100	100	100	100	100	100	100
5h	100	100	100	100	100	100	100
6h	100	100	100	100	100	100	100
7h	100	100	100	100	100	100	100
8h	100	100	100	100	100	100	100
9h	0	0	0	0	0	0	0
10h	0	0	0	0	0	0	0
11h	0	0	0	0	0	0	0
12h	0	0	0	0	0	0	0
13h	0	0	0	0	0	0	0
14h	0	0	0	0	0	0	0
15h	0	0	0	0	0	0	0
16h	0	0	0	0	0	0	0
17h	0	0	0	0	0	0	0
18h	0	0	0	0	0	0	0
19h	0	0	0	0	0	0	0
20h	100	100	100	100	100	100	100
21h	100	100	100	100	100	100	100
22h	100	100	100	100	100	100	100
23h	100	100	100	100	100	100	100
24h	100	100	100	100	100	100	100

Figure 23 Exemple de scénario horo-journalier d'ouverture des fenêtres (période estivale)

III-1-2-7) DÉROULEMENT DES CALCULS

Dans une approche nodale, chaque zone du bâtiment (composé de n zones) considéré vérifie la conservation de la masse qui s'exprimera pour une zone i et ses zones adjacentes j :

$$\sum_j \dot{m}_{i \rightarrow j} = 0 \quad (103)$$

Avec

$$\dot{m}_{i \rightarrow j} \quad \text{Débit massique de la zone } i \text{ vers la zone } j \quad (\text{kg.s}^{-1})$$

Cette écriture, pour chaque zone, aboutit à un système non linéaire où les inconnues sont les pressions de référence. Les zones sont reliées entre elles par des connexions aérauliques modélisées par des lois d'écoulement.

On suppose que chaque zone du bâtiment est « bien mélangée ». Température et masse volumique de l'air sont uniformes. Une hauteur de référence est assignée (le niveau bas de la zone), à laquelle est affecté une pression de référence, pression qui varie ensuite de façon hydrostatique en fonction de l'altitude z par rapport au niveau de référence :

$$P(z) = P_{ref} - \rho g z \quad (104)$$

Le débit d'air entre une zone i et une zone j s'exprime en fonction de la différence de pression ΔP entre ces zones. L'air transite par les connexions aérauliques, selon les relations, empiriques ou théoriques évoquées au paragraphe II-2-3 :

$$\dot{m}_{i \rightarrow j} = f_{i \rightarrow j}(\Delta P) \quad (105)$$

Le problème se trouve donc réduit à n équations non linéaires. L'inconnue est le vecteur des pressions internes $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ tel que :

$$f(P) = 0 \quad (106)$$

$f(P)$ est le vecteur dont chaque élément i s'exprime par $\sum_{j=1}^n \dot{m}_{i \rightarrow j}$.

A partir des conditions aux limites (les pressions exercées sur l'enveloppe du bâtiment), ce problème se résout selon la méthode itérative de Newton-Raphson. Une initialisation permet d'affecter des valeurs initiales aux éléments de P . On exprime le vecteur des pressions à l'itération $k+1$ en fonction de sa valeur à l'itération k jusqu'à ce que la valeur des résidus contenus dans le vecteur $f(P^k)$ satisfasse au critère de convergence.

A l'itération $k+1$, la pression s'exprime donc par l'équation suivante :

$$P^{k+1} = P^k - \frac{f(P^k)}{J(P^k)} \quad (107)$$

Avec la matrice jacobienne :

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial P_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial P_n} \end{pmatrix} \quad (108)$$

En introduisant le vecteur X de correction des pressions, on peut réécrire l'équation :

$$P^{k+1} = P^k - X^k \quad (109)$$

Avec :

$$J(P^k)X^k = f(P^k) \quad (110)$$

Pour résoudre ce système, la matrice jacobienne étant symétrique définie positive, on peut appliquer une factorisation de Cholesky. Celle-ci est alors égale au produit entre une matrice triangulaire L et sa transposée $^T L$.

Le système est donc résolu en trois étapes :

✓ Calcul de L et $^T L$:

$$JX = (L^T L)X = F \quad (111)$$

✓ Détermination d'une solution intermédiaire Y :

$$LY = F \quad (112)$$

✓ Détermination de X à partir de Y :

$$^T L Y = X \quad (113)$$

Pour accélérer la convergence, [WALTON, 1989] introduit un coefficient de relaxation ω tel que :

$$\omega = \frac{1}{1-r} \quad (114)$$

Avec

$$r = \frac{X^{k+1}}{X^k} \quad (115)$$

La convergence est atteinte quand le critère suivant est respecté pour chaque zone :

$$\frac{\left| \sum_j \dot{m}_{i \rightarrow j} \right|}{\sum_j \left| \dot{m}_{i \rightarrow j} \right|} < \varepsilon \quad (116)$$

L'organigramme des calculs est représenté dans la Figure 24.

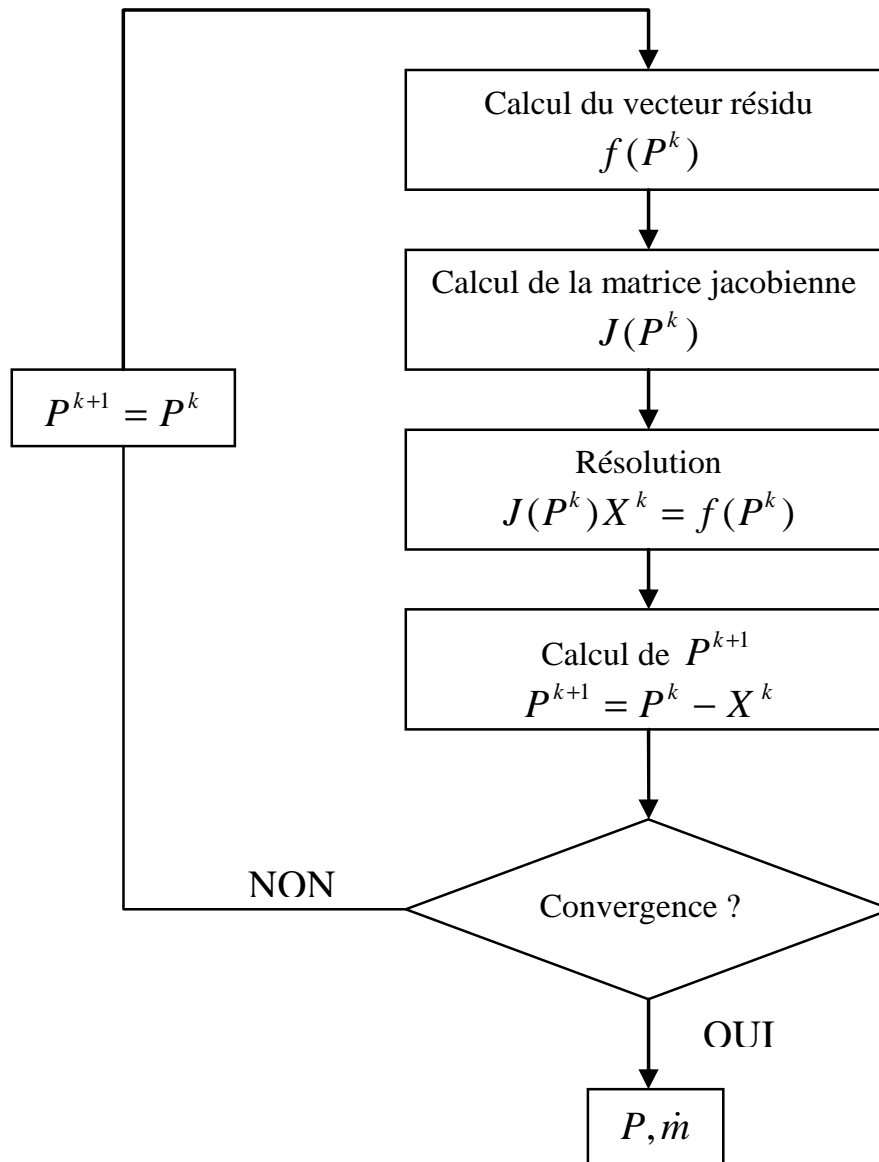


Figure 24 Organigramme des calculs de l'approche nodale

III-1-3) LE MODÈLE THERMIQUE

III-1-3-1) LE MODÈLE D'ENVELOPPE DU BÂTIMENT

Le modèle COMFIE a été développé par [PEUPORTIER & BLANC SOMMEREUX, 1990]. Il s'agit d'un outil de simulation thermique dynamique (il permet de modéliser le stockage de la chaleur et d'évaluer les gains solaires utiles) aux volumes finis réduit par analyse modale [LEFEBVRE, 1987]. On peut appliquer l'analyse modale, la plupart des phénomènes physiques ayant une influence sur le comportement thermique d'un bâtiment pouvant être représentés par des équations linéaires.

Le bâtiment est découpé en zones thermiques, c'est-à-dire en zones ayant des caractéristiques thermiques homogènes. Dans chacune de ces zones, on suppose la température uniforme. Les parois sont décomposées en mailles sur lesquelles un bilan thermique est écrit. Afin de limiter le temps de calcul, le nombre de mailles utilisées pour décrire le système est réduit. Dans cette optique, on place les mailles de manière à respecter les principes suivants :

- ✓ On ne regroupe pas dans une maille des couches de matériaux séparées par un isolant ;
- ✓ Le nombre de mailles doit être plus important dans les murs massifs que dans les cloisons légères ;
- ✓ Des mailles plus fines sont définies à la surface interne de la paroi (du fait de l'influence plus importante de ces dernières sur la température de zone) ;
- ✓ Les propriétés physiques des matériaux constituant une maille sont combinées : les inerties et les résistances thermiques sont additionnées ;
- ✓ Il n'y a jamais de mailles dans les isolants, leur capacité thermique étant considérée comme négligeable par rapport à celle des autres matériaux. Un isolant est donc modélisé par une résistance thermique et son inertie ajoutée à celle des mailles voisines ;
- ✓ On ne place pas de mailles dans un vitrage, de faible inertie par rapport aux parois.

Le climat est représenté par des années type comme les TRY (pour Test Reference Year) [LUND, 1985]. Les fichiers TRY utilisés contiennent :

- ✓ Les informations sur la station ;
- ✓ La date ;
- ✓ La température extérieure sèche en $1/10^{\circ}\text{C}$;
- ✓ Le rayonnement global horizontal en J.cm^{-2} ;
- ✓ Le rayonnement diffus horizontal en J.cm^{-2} ;
- ✓ La vitesse du vent en m.s^{-1} ;
- ✓ L'orientation du vent en $^{\circ}$.

Pour chaque zone, le bilan thermique des mailles peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$C\dot{T} = A.T + E.U \quad (117)$$

$$Y = J.T + G.U \quad (118)$$

Avec

\dot{T} Champ discrétisé des températures
 U Vecteur des sollicitations

Y	Vecteur des sorties
C	Matrice diagonale des capacités thermiques
A	Matrice contenant les termes d'échange entre mailles
E	Matrice contenant les termes d'échanges entre mailles et sollicitations
J	Matrice qui relie les sorties aux températures des mailles
G	Matrice qui relie les sorties aux sollicitations

Le champ des températures T peut se réécrire comme la somme d'un terme en régime permanent et d'un terme en régime dynamique. De plus, un changement de base permet de transformer le système précédent en :

$$\dot{X} = F.X + B.U \quad (119)$$

$$Y = H.X + S.U \quad (120)$$

$$T = P.X \quad (121)$$

Avec

P	Matrice de passage
X	Vecteur d'état du système
F, B	Matrices dépendant de A, E, J et G. F est une matrice diagonale dont le
H, S	i ^{ème} terme est $1/\tau_i$ (τ_i est la constante de temps de la zone)

Cette écriture permet au système d'être réduit par analyse modale. On obtient un modèle d'ordre réduit en ne conservant que les N_{modes} plus grandes constantes de temps différentes. Une comparaison avec un modèle non réduit a montré que la valeur $N_{\text{modes}} = 6$ suffit dans les cas étudiés pour rendre compte du comportement dynamique des zones [SALOMON, MIKOLASEK & PEUPORTIER, 2005]. Le premier mode associé à la plus grande constante de temps, représente l'évolution globale vers le régime permanent. Les autres sont représentatifs de dynamiques plus rapides liées à des composants (murs, planchers...) et à des sollicitations, par exemple des variations quotidiennes d'ensoleillement, une puissance de chauffe régulée, etc.

La dernière étape de la résolution du problème est le couplage entre les systèmes matriciels des différentes zones du bâtiment. Le vecteur des sollicitations est alors décomposé en deux : un vecteur des sollicitations extérieures (température extérieure, flux solaire, puissance interne) et un vecteur des variables de couplage (températures équivalentes de sortie des zones, par exemple au niveau d'une paroi intermédiaire entre 2 zones). Intégré sur un pas de temps Δt , les valeurs au pas de temps $n+1$ vont pouvoir s'exprimer en fonction des valeurs au pas de temps n de la façon suivante :

$$Y^{n+1} = M_1 X^n + M_2 U^{n+1} + M_3 U^n + M_4 Y^n \quad (122)$$

$$X^{n+1} = e^{F\Delta t} X^n + M_5 (U^{n+1} - U^n) + M_6 (Y^{n+1} - Y^n) \quad (123)$$

Avec

M_1, \dots, M_6 matrices exprimées en fonction des matrices précédentes

Les échanges thermiques dus aux mouvements d'air qui étaient jusqu'à présent pris en compte à travers des équations simplifiées sont maintenant couplés au modèle modal réduit pendant la

simulation. L'objet informatique "mouvement d'air" fournit des puissances thermiques correspondant à la ventilation qui sont incluses dans le vecteur des sollicitations internes.

III-1-3-2) ECHANGES THERMIQUES DUS A LA VENTILATION

Dans COMFIE, les débits dus à la ventilation et aux infiltrations d'air sont pris en compte dans le vecteur des sollicitations, fonction de la valeur imposée du débit indiqué par l'utilisateur dans un scénario horo-journalier.

Cette sollicitation devra maintenant être réévaluée, pour un même pas de temps, en fonction des débits d'air calculés par le modèle aéraulique. Finalement, pour une zone i reliée à j zones, on réalisera le bilan suivant :

$$P_{air} = \sum_j \dot{m}_{i \rightarrow j} C_{p_{air}} (T_i - T_j) \quad (124)$$

Avec

P_{air}	Puissance sensible	(W)
$C_{p_{air}}$	Capacité calorifique de l'air	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)

On ne prend pas en compte ici les transferts d'énergie latente dus à la présence d'humidité dans l'air. Le transport de l'humidité n'est, pour l'instant, pas pris en compte dans COMFIE. Cet aspect pourra être traité par ailleurs : il sera en effet possible de coupler un modèle de transport de polluants (humidité, composés organiques volatils, etc.) au modèle aéraulique actuellement mis en place. Dans ce cas, la puissance latente échangée entre deux zones pourra s'exprimer :

$$P_l = \dot{m}_{i \rightarrow j} L W \quad (125)$$

Avec

L	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	(J.kg ⁻¹)
W	Différence d'humidité spécifique entre les deux zones	(kg.kg ⁻¹)

Remarque

Dans le cas d'une zone soumise à un débit d'infiltrations d'air de Q_{inf} , devant être renouvelée d'un débit Q_{mv} par un système de ventilation avec récupérateur de chaleur d'efficacité eff , la puissance effective nécessaire au chauffage de l'air devient :

$$P = \rho (Q_{inf} + Q_{mv} (1 - eff)) C_{p_{air}} (T_{ext} - T_{int}) \quad (126)$$

III-1-4) COUPLAGE MOUVEMENTS D'AIR / THERMIQUE

Au paragraphe précédent, on a vu que les puissances thermiques échangées entre les zones du bâtiment dépendent des débits d'air existants entre ces zones. Dans cette partie, suite à un état de l'art des approches existantes, une stratégie de couplage entre l'étude thermique et l'étude aéraulique du bâtiment est proposée.

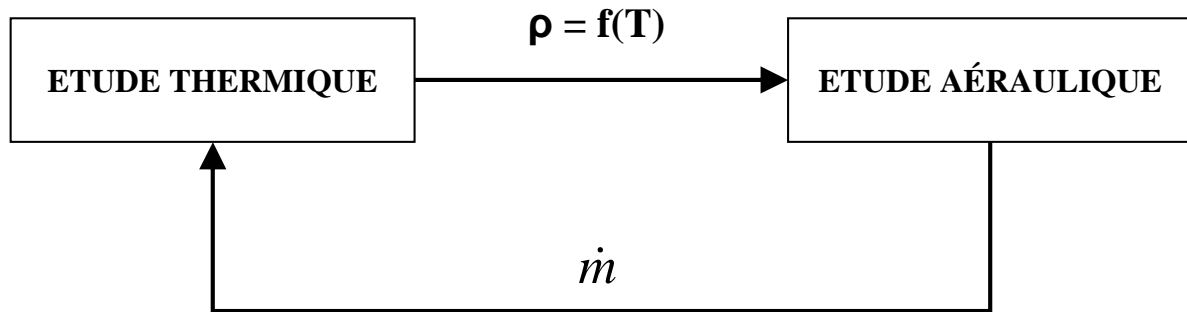


Figure 25 Principe du couplage thermo-aéraulique

III-1-4-1) APPROCHES EXISTANTES

Les débits d'air calculés à partir des différences de pression par le modèle aéraulique servent de donnée d'entrée au modèle thermique qui évalue des températures de zones. Ces températures permettent de calculer plus précisément la masse volumique de l'air et donc d'affiner le calcul des différences de pression dues au tirage thermique.

Il existe plusieurs approches pour effectuer un couplage entre les deux modèles. [MORA, 2003] et [AXLEY, 2006] distinguent deux grandes familles de couplages : les méthodes synchrones et asynchrones.

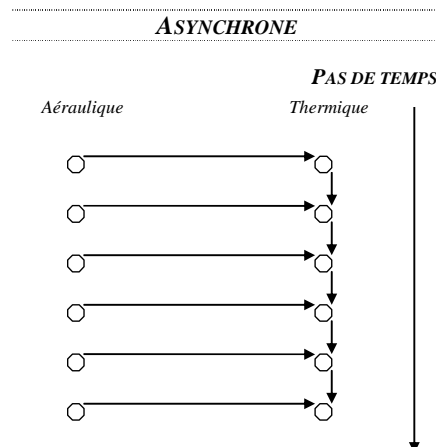


Figure 26 Méthode de couplage asynchrone [HENSEN, 1995]

Dans le cas des méthodes asynchrones, les deux modèles ne sont à aucun moment bouclés (cas de la Figure 26). En général, les sorties des modèles aérauliques servent directement de données d'entrée au modèle thermique. Il est par exemple possible d'exporter les résultats des logiciels COMIS et CONTAM vers TRNSYS. Cette approche ne permet pas d'évaluer l'interaction entre les transferts thermiques et aérauliques. Pour cette raison, on lui préférera un couplage synchrone.

En ce qui concerne les méthodes synchrones, [HENSEN, 1995] propose deux approches pour coupler un modèle thermique à un modèle de mouvements d'air. Les méthodes "Ping-pong" et "Onions".

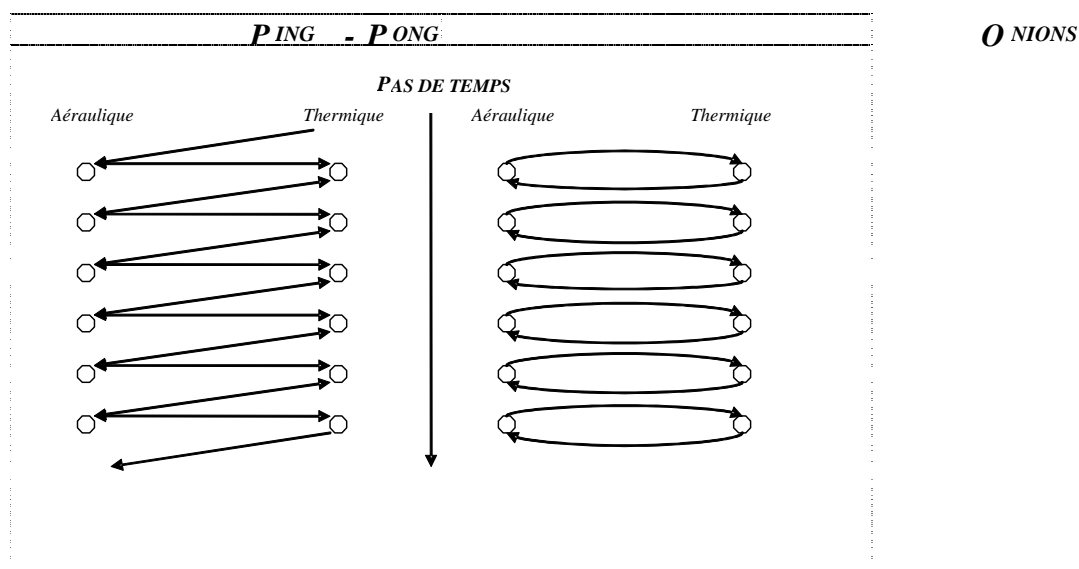


Figure 27 Méthodes de couplage synchrone : principes [HENSEN, 1995]

Dans l'approche "Ping-pong", les sorties d'un des deux modèle servent d'entrées à l'autre modèle au pas de temps suivant.

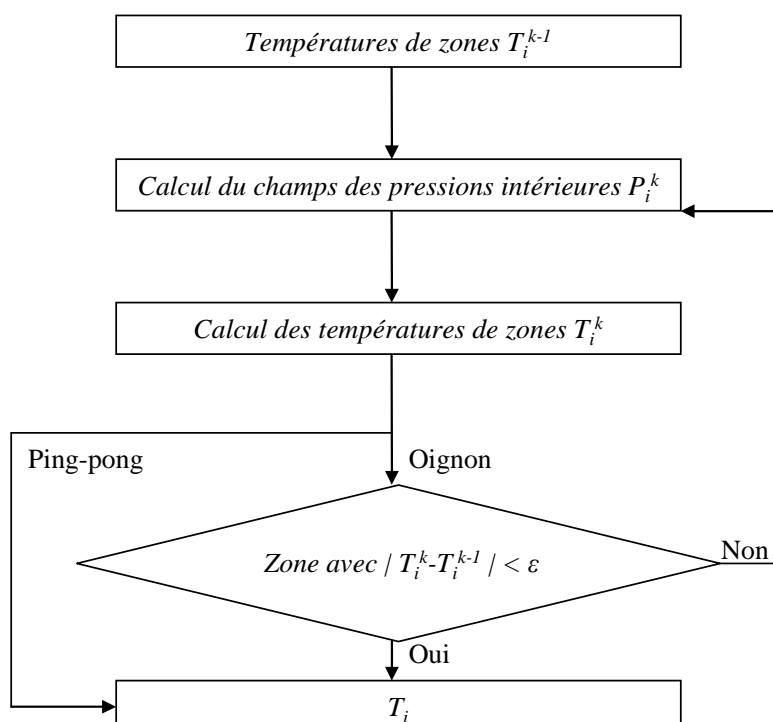


Figure 28 Méthodes de couplage synchrones : mise en œuvre pour un pas de temps [HENSEN, 1995]

Dans l'approche "Onions", les deux modèles sont résolus conjointement à chaque pas de temps jusqu'à ce qu'un critère de convergence commun soit atteint.

Correctement utilisées, ces deux méthodes aboutissent à des résultats satisfaisants. L'approche "Ping-pong" sera privilégiée dans le cas où le pas de temps choisi est faible devant la constante de temps du système étudié. Elle aboutira au même résultat que la méthode "Onions" en un temps de calcul plus faible. [JREIJRY & AL, 2007] ont développé et validé cette approche pour caractériser les performances de bâtiments équipés de systèmes de ventilation hybride. Pour garantir le bon fonctionnement de la simulation, les auteurs ont choisi un pas de temps de 1 à 3 minutes.

Pour un pas de temps long (une heure par exemple) il est préférable d'utiliser la méthode "Onions". Le critère de convergence doit être judicieusement choisi pour respecter l'intégrité du système. Cette approche a notamment été retenue pour lier COMIS à TRNSYS [WEBER & AL., 2003] ou pour élaborer un outil de modélisation de ventilation naturelle par [KOANIKIS, 2005].

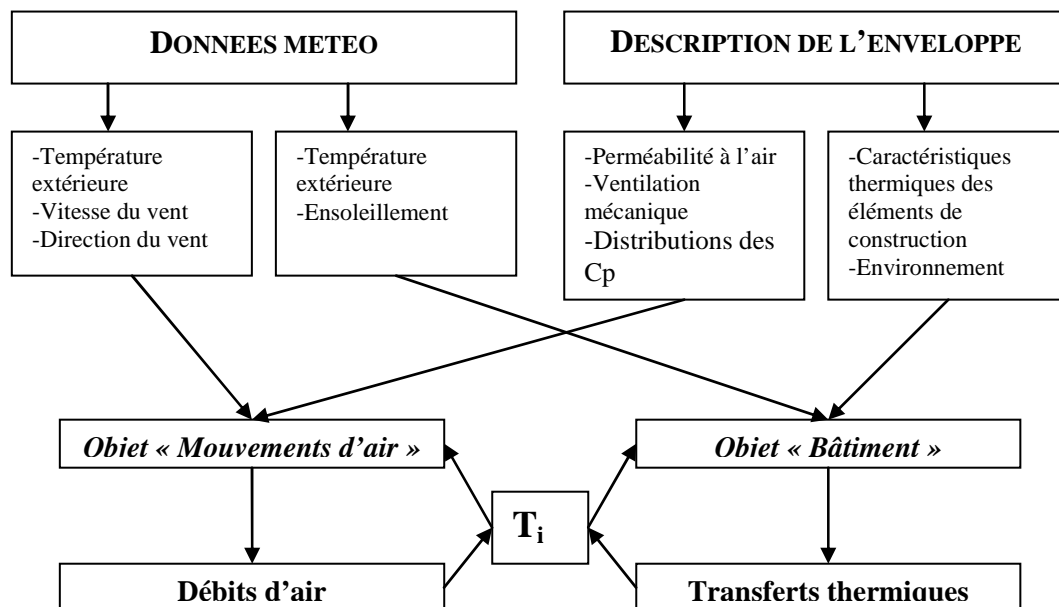


Figure 29 Structure du modèle thermo-aéraulique

III-1-4-2) APPROCHE RETENUE

L'objectif est d'évaluer l'interaction entre les mouvements d'air et les consommations énergétiques, il semble judicieux de choisir une méthode de couplage synchrone. La simulation thermique dynamique d'un bâtiment proposée par COMFIE permet de réaliser des simulations sur un pas de temps de 1/10 d'heure à 1 heure. Pour une telle échelle de pas de temps, la méthode "Onions" semble donc la plus adaptée.

On choisit donc cette approche en portant une attention particulière à la définition de la température prise en compte. Pour garantir la stabilité de la convergence du système étudié, la température qui permet d'évaluer les débits d'air est prise égale à la moyenne de la température sur le pas de temps (moyenne entre la température au pas de temps n et au pas de temps $n+1$). Pour un pas de temps, l'organigramme des calculs est le représenté sur la Figure 30.

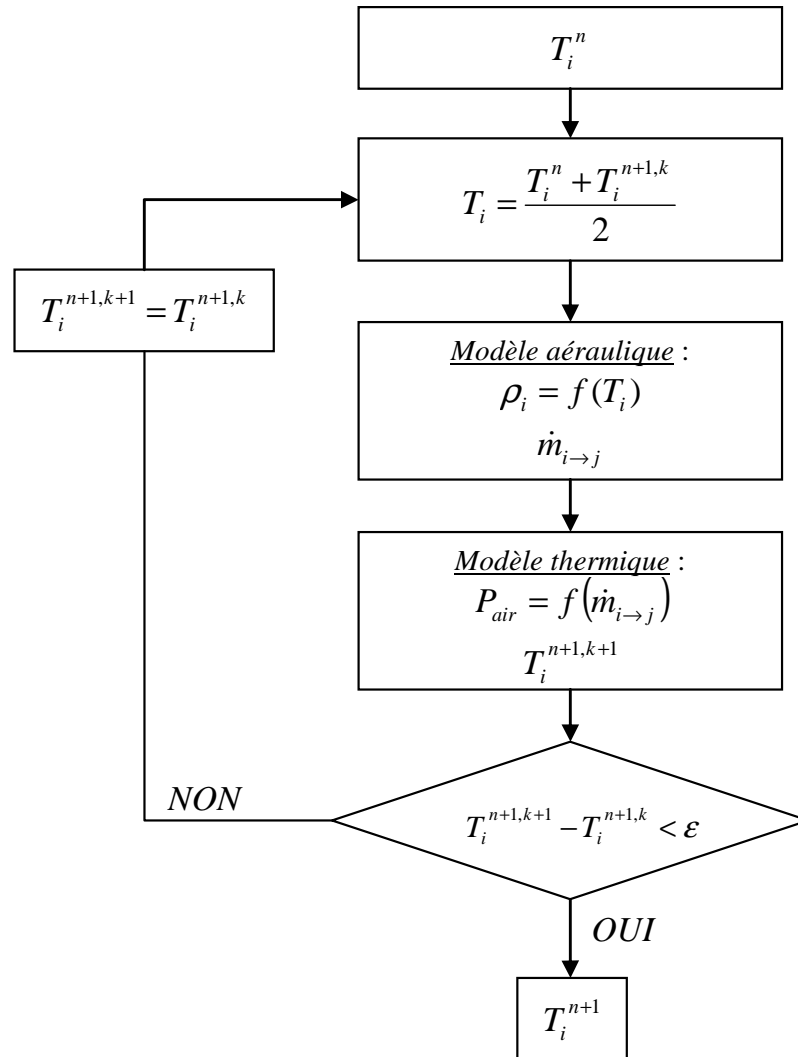


Figure 30 Organigramme des calculs

III-2) AMÉLIORATION D'UN OUTIL D'AIDE A LA CONCEPTION ET MISE EN ŒUVRE INFORMATIQUE

L'objectif de cette partie est de décrire les étapes de réflexions nécessaires à l'implémentation informatique de l'objet mouvement d'air dans l'outil d'aide à la conception COMFIE. Le travail de programmation informatique a été effectué sous l'environnement orienté objet Borland Delphi (langage Pascal).

III-2-1) STRUCTURATION DES DONNNEES DANS COMFIE

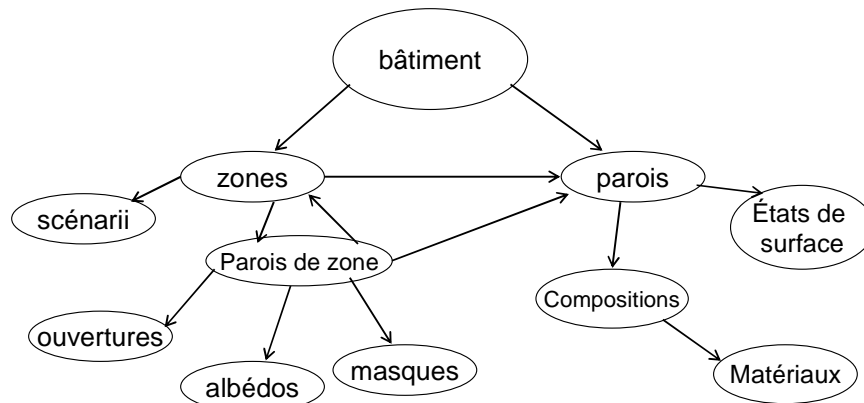


Figure 31 Structuration des données de l'objet bâtiment [PEUPORTIER & BLANC SOMMEREUX, 2004]

Dans COMFIE, le bâtiment est décrit comme un ensemble structuré d'objets reliés par des pointeurs. Des revêtements de base (matériaux, vitrage, revêtements de mur) sont combinés pour former des structures plus complexes : parois, zones et bâtiment entier. L'usage du bâtiment par ses occupants est également pris en compte à travers des scénarii de fonctionnement horo-journaliers : occupation, puissance dissipée, renouvellement d'air hygiénique, consigne de chauffage ou de climatisation. Au final, la structure de données du bâtiment est explicitée par la Figure 31.

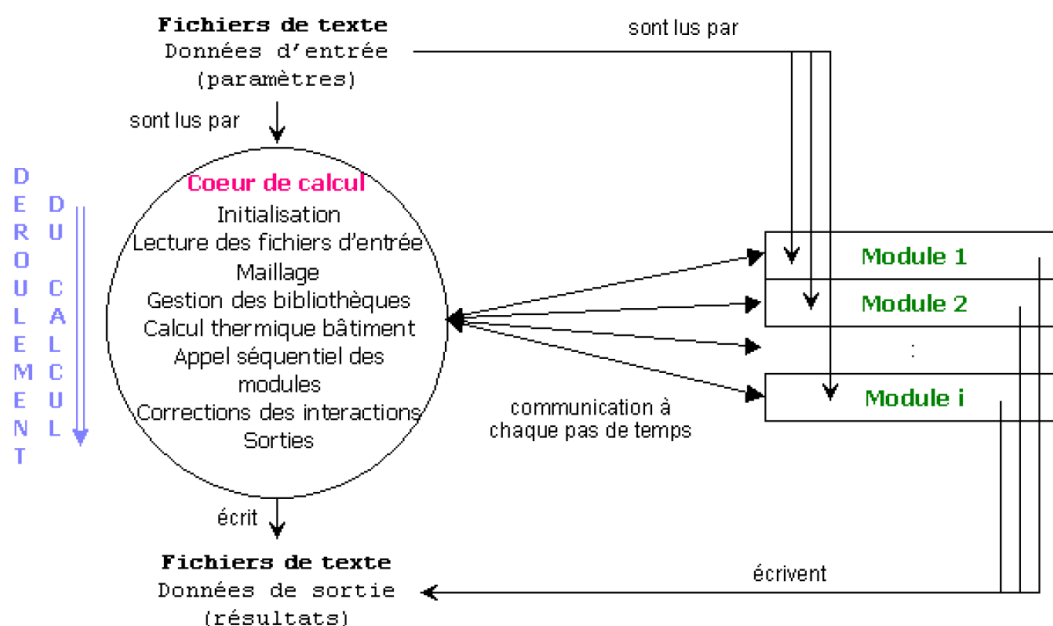


Figure 32 Organisation des échanges d'information au sein de COMFIE [THIERS, 2008]

Cette organisation du logiciel facilite la modification, l'addition la suppression ou le remplacement d'un objet [SALOMON, MIKOLASEK & PEUPORTIER, 2005]. Cette programmation orientée objet a permis d'ajouter des composants pouvant interagir avec le reste de l'enveloppe comme les systèmes solaires thermiques [GUIAVARCH, 2003] (composant 1) ou les puits canadiens (composant 6) [THIERS, 2008] comme le montre la Figure 32.

Le modèle de mouvement d'air est ainsi implémenté dans le composant n°2 : COMPO2.

III-2-2) ORGANISATION DU COMPO2

III-2-2-1) STRUCTURATION DES DONNÉES

Le module COMPO2 diffère des autres dans le sens où il ne s'agit pas d'ajouter un composant physique au bâtiment. Ici, on souhaite donner la possibilité au concepteur d'étudier, avec plus de précision, l'influence des mouvements d'air sur les besoins de chauffage et le confort d'été.

On considère un objet "mouvement d'air" dont les données d'entrées relatives aux zones thermique du bâtiment (surface et élévation de la zone, température, débit de ventilation mécanique) et aux sollicitations météorologiques (température extérieure, vitesse et direction du vent) sont, à chaque pas de temps, issues du cœur de calcul.

Le travail de saisie supplémentaire ne consiste donc qu'en la caractérisation des connexions aérauliques (défauts d'étanchéité, grandes ouvertures, entrées d'air, etc.) issues d'une bibliothèque.

L'objet informatique est défini comme un ensemble de méthodes qui permettent d'évaluer les débits d'air :

Procédure "driving forces" : Elle établit la liste des sollicitations à calculer par le programme principal. Les informations sont stockées dans le fichier F2SOLLI après avoir été calculées heure par heure par le programme principal. Il s'agit de la température extérieure, de la vitesse et de la direction du vent.

Procédure "initialization" : Cette procédure a pour but de fixer les valeurs initiales des variables d'état. Sont aussi créées les variables dynamiques utilisées pendant la simulation pour communiquer avec le programme principal.

Variables dynamiques	
real_state_C2, integer_state_C2 & boolean_state_C2	Tableau des réels, entiers et booléens échangés.
U_C2, Uprime_C2	Vecteur des sollicitations au début et à la fin du pas de temps.
Thermal_C2	Puissances thermiques fournies à chaque zone par l'objet.
Out_C2	Sorties du modèle (pression des zones et débits interzones).

Tableau 20 Variables dynamiques permettant un échange avec le programme principal

C'est à l'initialisation qu'est lu le fichier texte contenant les paramètres des connexions aérauliques du bâtiment (cf. Tableau 21).

Paramètres	
zone1 & zone2	Zones reliées par la connexion, par convention zone1 → zone2 est le sens positif de circulation de l'air
Zl	Altitude absolue de la connexion (permet de déduire l'altitude relative pour zone1 et zone2)
Type de connexion	A choisir dans une bibliothèque de composant (défaut d'étanchéité, entrée d'air, grande ouverture, etc.). Permet de déduire les coefficients C et n

Tableau 21 Paramètres des connexions aérauliques

Un premier calcul de pression est effectué pour fournir une solution initiale à la résolution de Newton-Raphson.

Procédure “incrementation” : A chaque pas de temps, elle calcule la valeur des sollicitations au début et à la fin du pas de temps (entre 1/10 et 1 heure) et écrit, chaque semaine, les sorties horaires dans le fichier de résultat de la simulation.

Procédure “step” : C'est la procédure qui contient le modèle de ventilation. Un premier calcul de pression est effectué pour fournir une solution initiale à la résolution de Newton-Raphson, puis elle calcule sur un pas de temps une première estimation des puissances fournies aux zones du bâtiment par les mouvements d'air à partir des sollicitations et des informations sur les zones.

Procédure “corstep” : Elle corrige les puissances fournies par l'objet aux différentes zones du bâtiment par itération avec le programme principal. Les nouvelles puissances permettent au programme principal de calculer de nouvelles températures de zones jusqu'au respect du critère de convergence sur la température.

Procédure “output” : Elle écrit un fichier, RESULTS2, dont chaque ligne correspond à une heure de simulation et chaque colonne à une sortie : pression en Pa, débit en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et puissance fournie en W.

III-2-2-1) CALCUL DES DÉBITS DE VENTILATION

Les débits de ventilation sont calculés dans les procédures “step” puis “corstep” du composant 2. L'implémentation du calcul des puissances fournies par les mouvements d'air aux différentes zones du bâtiment est effectuée de la manière suivante :

- Calculs préliminaires :
 - ✓ Masse volumique de l'air pour chaque zone ;
 - ✓ Coefficients de pression ;
 - ✓ Pression exercée par le vent ;
 - ✓ Pression due au tirage thermique ;
 - ✓ Caractérisation des grandes ouvertures.

- Les pressions de référence initiales des zones sont les pressions du pas de temps précédent.

- Tant que $\left| \frac{\sum_{j=1}^n \dot{m}_{i \rightarrow j}}{\sum_{j=1}^n |\dot{m}_{i \rightarrow j}|} \right| > \varepsilon$ quelquesoit la zone, alors :
 - ✓ Remplissage de la matrice jacobienne ;
 - ✓ Remplissage du vecteur résidu ;
 - ✓ Résolution de $J(P^k)X^k = f(P^k)$;
 - ✓ Nouvelle pression de référence.

- Calcul des débits à travers chaque connexion aéraulique.
- Calcul des puissances fournies pour chaque zone.

III-2-3) MÉTHODOLOGIE POUR LE CHAINAGE MOUVEMENTS D'AIR / BATIMENT

Comme le montre la Figure 33, le programme principal permet une première estimation de la température qui sert de donnée d'entrée à la première estimation des puissances injectées dans les zones. Des itérations entre les deux modèles ont ensuite lieu jusqu'à convergence. Pour assurer cette dernière, la communication entre les deux modèles est assurée par la procédure CORRAIR.

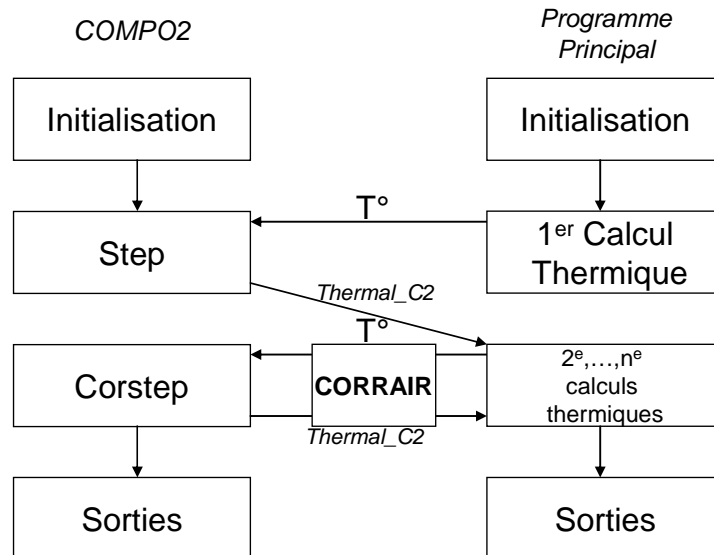


Figure 33 Chainage informatique entre les deux modèles pour un pas de temps

Le rôle de cette procédure est d'une part de corriger et fournir les variables d'échange entre les deux modèles. D'autre part, elle doit contrôler la convergence du système. A chaque itération, on prend en compte la moyenne de la température sur le pas de temps pour effectuer les calculs aérauliques. Cette dernière hypothèse revient à introduire un coefficient de sous relaxation de 0,5 dans la résolution du problème. Ce coefficient permet d'éviter une évolution oscillante des températures pendant le processus. Enfin, le dispositif est amélioré en bornant les températures de zones entre deux valeurs T_{\min} et T_{\max} .

L'organisation des calculs au pas de temps n dans la procédure CORRAIR est la suivante :

- Initvent, pour chaque zone :
 - ✓ Récupération des températures des zones adjacentes avec qui la zone réalise un échange aéraulique ;
 - ✓ Détermination de l'intervalle dans lequel se situe la température de zone : T_{\min} et T_{\max} , respectivement la plus petite et la plus grande température de zone adjacente (y compris l'extérieur) ;
 - ✓ Initialisation de la température de zone prise en compte pour la correction sur les échanges d'air : $T_z = (T_{\min} + T_{\max})/2$.
- Tant que $T_i^{n+1,k+1} - T_i^{n+1,k} > \varepsilon$, alors, à l'itération $k+1$:
 - ✓ Corstep : calcul des débits de ventilation avec $T_{\text{zone}} = T_z$ (cf. partie III-2-2-1) ;
 - ✓ $K+1$ ème calcul des températures de zone au pas de temps suivant (T^{n+1}) par le programme principal ;
 - ✓ Corrigevent 1 :
 - $T_z = (T^n + T^{n+1})/2$
 - Si $T^{n+1} < T_{\min}$ alors $T_z = (T^n + T_{\min})/2$
 - Si $T^{n+1} > T_{\max}$ alors $T_z = (T^n + T_{\max})/2$
 - Si la zone est chauffée et $T_n > T_{\text{consigne}}$ et $T^{n+1} < T_{\text{consigne}}$ alors $T_z = (T^n + T_{\text{consigne}})/2$
 - Si la zone est climatisée et $T_n < T_{\text{consigne}}$ et $T^{n+1} > T_{\text{consigne}}$ alors $T_z = (T^n + T_{\text{consigne}})/2$;
 - ✓ Corrigevent 2 (permet d'éviter les oscillations quand la température de zone est proche de la température d'une zone adjacente) :
 - Si $T_{\text{adj}}^n > T_z^n + \varepsilon$ et $T_{\text{adj}}^{n+1} < T_z^{n+1}$ alors $T_z^{n+1} = (T_z^{n+1} + T_{\text{adj}}^{n+1})/2$
 - Si $T_{\text{adj}}^n < T_z^n - \varepsilon$ et $T_{\text{adj}}^{n+1} > T_z^{n+1}$ alors $T_z^{n+1} = (T_z^{n+1} + T_{\text{adj}}^{n+1})/2$;
 - ✓ Nouveau calcul des bornes :
 - Si $T_z^{k+1} > T_z^k + \varepsilon$ et $T_z^k > T_{\min}$ alors $T_{\min} = T_z^k$
 - Si $T_z^{k+1} < T_z^k - \varepsilon$ et $T_z^k < T_{\max}$ alors $T_{\max} = T_z^k$
 - ✓ Calcul de $|T_z^{k+1} - T_z^k|$ et vérification de la convergence.
- Ecriture de la température et du débit pour le pas de temps.

III-2-4) ATTENTIONS PARTICULIERES A LA RESOLUTION NUMÉRIQUE

III-2-4-1) INITIALISATION

Dans le cadre de la résolution numérique par la méthode de Newton-Raphson, il est important de disposer d'un vecteur initial des pressions se trouvant dans le domaine de convergence. Dans le cas contraire, le problème ne pourra être résolu. Afin de disposer d'une estimation de ce vecteur, [WALTON, 1989] propose de résoudre une première fois le problème avec des équations de débit linéarisées : le coefficient d'écoulement est alors fixé égal à 1. Cette

hypothèse revient donc à étudier l'ensemble du bâtiment en régime laminaire. Informatiquement, le problème est résolu par la même procédure que $J(P^k)X^k = f(P^k)$. On applique cette méthode lors de l'initialisation du premier calcul à chaque pas de temps. En effet, à chaque pas de temps, la vitesse et la direction du vent peuvent radicalement changer le champ des pressions résolu par le modèle.

III-2-4-2) FAIBLES DIFFÉRENCE DE PRESSION

Dans le cas de faibles différences de pression entre les zones ($\Delta P \rightarrow 0$), les termes de la matrice jacobienne vont avoir tendance à tendre vers l'infini. De la même manière que dans la partie précédente, [WALTON, 1989] propose de linéariser l'expression des débits pour des différences de pressions inter-zones inférieures à 10^{-5} Pa.

III-2-5) INTERFACE

L'utilisateur peut organiser son réseau de connexions aéraliques via une interface intuitive. L'onglet "ventilation interne" présente les différentes zones thermiques qu'il convient de relier entre elles par l'élément souhaité (porte, ventilation forcée, etc.).

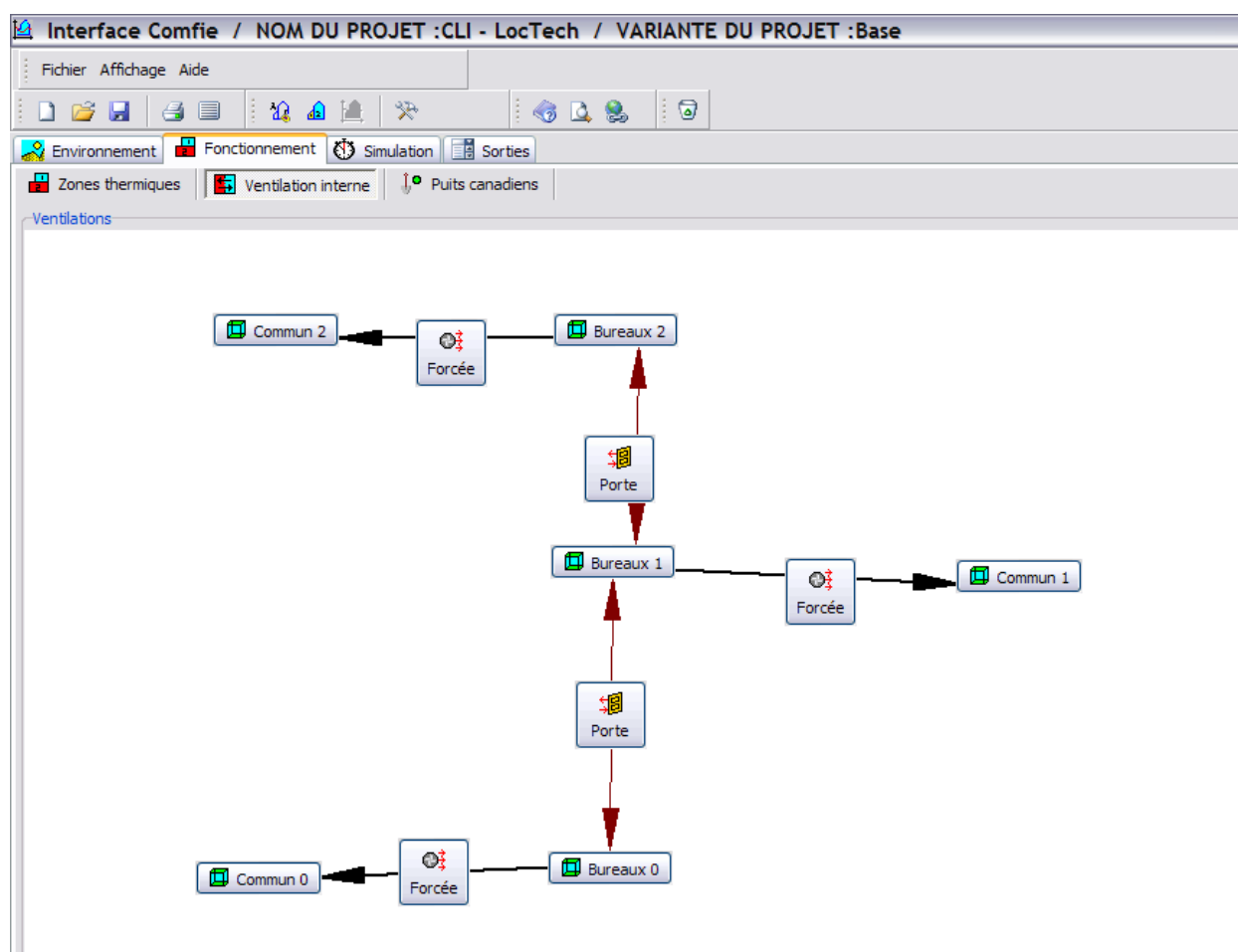


Figure 34 Saisie graphique des connexions aéraliques dans l'interface Pléiades

III-3) ELÉMENTS DE VALIDATION

Dans cette partie, le modèle aéraulique est confronté à des solutions analytiques puis aux résultats de logiciels de simulation aéraulique. Les comparaisons proposées sont issues des travaux de [WALTON, 1989] (calcul d'un coefficient équivalent) et [FURBRINGER & AL, 1996] (configurations monozone avec vent seul, puis tirage thermique seul, vent et tirage thermique et enfin comparaison inter-modèles). Une comparaison avec le logiciel TRNflow, logiciel de simulation thermo-aéraulique développé par [WEBER & AL, 2003], a été effectuée pour juger de la fiabilité du couplage entre les modèles thermique et aéraulique.

III-3-1) COMPARAISON A DES SOLUTIONS ANALYTIQUES

III-3-1-1) CONFIGURATION DE WALTON

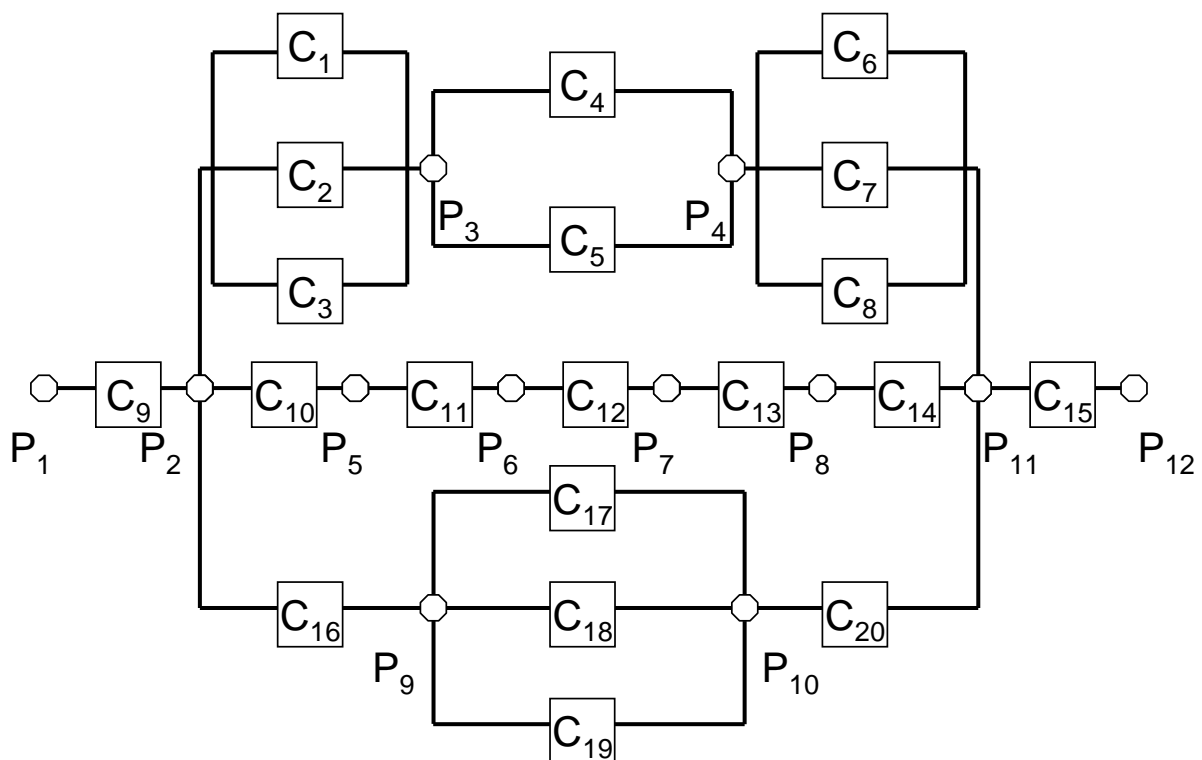


Figure 35 Configuration du réseau aéraulique

Le réseau représenté ici est un réseau complexe, comprenant 12 zones et 20 connexions, certaines en série, d'autres en parallèle. On suppose ici que toutes les connexions sont représentées par une loi d'orifice (équation (54)).

On peut réécrire le problème en combinant éléments en série et en parallèle. On obtient alors une connexion équivalente entre les zones caractérisées par les pressions P_1 et P_{12} .

Par exemple, une connexion équivalente, C_{eq} en $\text{kg.s}^{-1}.\text{Pa}^{-1/2}$, aux connexions en parallèle C_1 , C_2 et C_3 , aura pour coefficient géométrique la valeur suivante :

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (127)$$

Dans le cas de connexions en série, on pourra réécrire (exemple des connexions 10 à 14) :

$$C_{eq} = (1/C_{10}^2 + 1/C_{11}^2 + 1/C_{12}^2 + 1/C_{13}^2 + 1/C_{14}^2)^{1/2} \quad (128)$$

Au final, en recombinaut tous les connexions équivalentes (les caractéristiques initiales des connexions étant données dans le Tableau 22), on arrive à une seule connexion. Pour une différence de pression $P_1 - P_{12} = 100$ Pa et une masse volumique de l'air de 1,20415 on trouve un débit de 0,0611024 kg.s⁻¹ tant sur le plan analytique qu'au niveau de la simulation.

Connexion	C _d	A (m ²)	Connexion	C _d	A (m ²)
1	0,6	0,01	11	0,6	0,01
2	0,6	1	12	0,6	1
3	0,6	2	13	0,6	0,02
4	0,6	0,05	14	0,6	2
5	0,6	0,06	15	0,6	1
6	0,6	1	16	0,6	0,02
7	0,6	1	17	0,6	2
8	0,6	1	18	0,6	0,01
9	0,6	1	19	0,6	1
10	0,6	1	20	0,6	0,03

Tableau 22 Caractéristiques des composants du réseau étudié

III-3-1-2) CONFIGURATIONS “MONO”

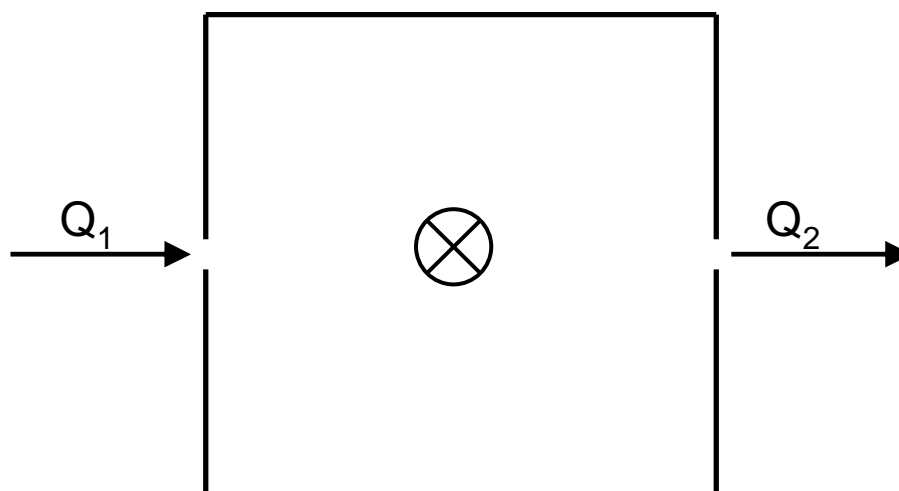


Figure 36 Configuration monowind

Dans le cas de la configuration monowind (Figure 36), on souhaite étudier l'influence du vent dans le cas d'un projet monozone et en l'absence de tirage thermique. On considère une façade face au vent et une façade sous le vent.

On étudie ensuite la configuration monostack (Figure 37). En l'absence de vent, cette configuration permet de vérifier le bon calcul des débits dus au tirage thermique. Deux connexions aéraliques (type crack) sont placées à des altitudes différentes et les températures intérieure et extérieure sont différentes.

Enfin, dans le cas monows, on garde la configuration précédente à laquelle on ajoute l'effet du vent.

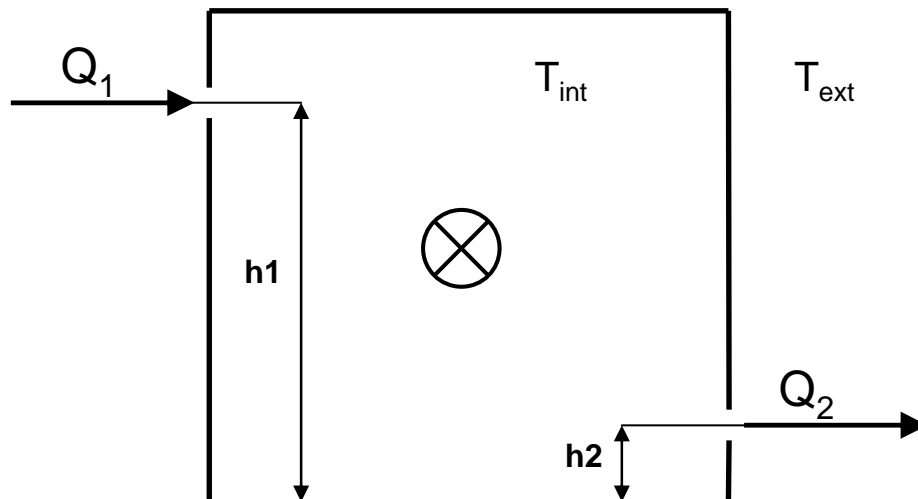


Figure 37 Configurations monostack et monows

Données d'entrée	Monowind	Monostack	Monows
$C_1 = 20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n}$	X	X	X
$C_2 = 20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n}$		X	X
$C_2 = 40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n}$	X		
$C_{p1} = 0,8$	X	-	X
$C_{p2} = -0,2$	X	-	X
$V_{\text{vent}} = 8,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	X	-	X
$\rho_{\text{int}} = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	-	X	X
$\rho_{\text{ext}} = 1,2929 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	X	X	X
$h_1 = 2 \text{ m}$	-	X	X
$h_2 = 0,5 \text{ m}$	-	X	X

Tableau 23 Hypothèses considérées pour les configurations étudiées

Les données d'entrées de ces problèmes sont exposées dans le Tableau 23. Les résultats exposés dans le Tableau 24 montrent la concordance entre les résultats du logiciel et ceux des solutions analytiques.

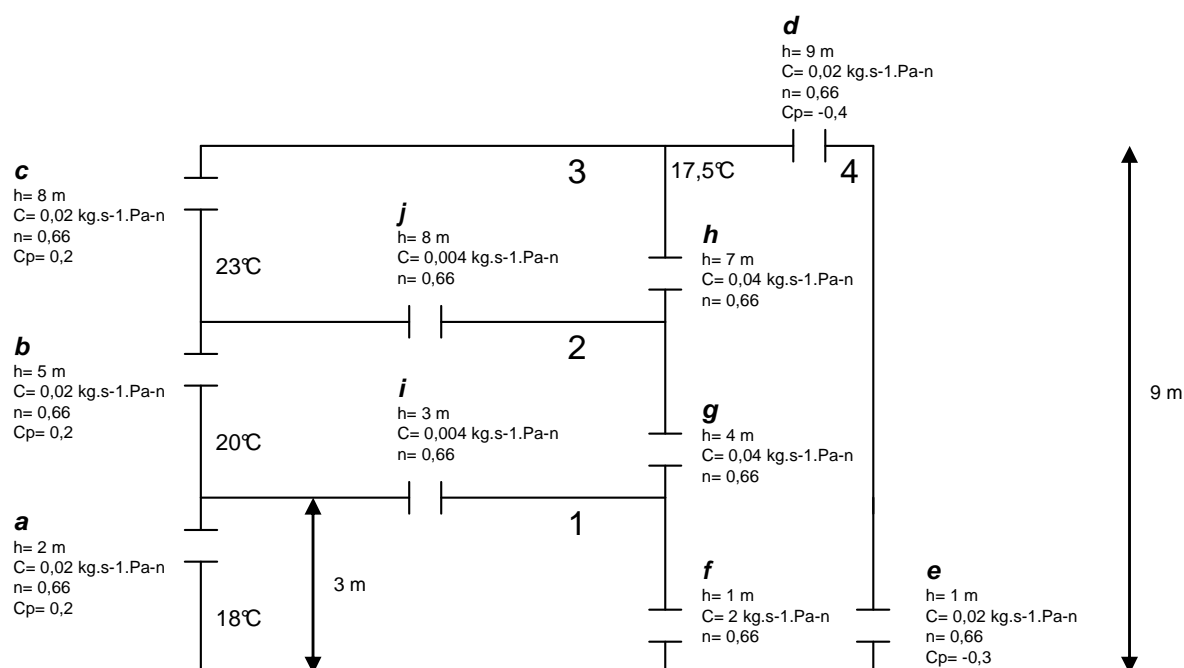
Test	Pression / débits	Solution analytique	COMFIE
Monowind	P [Pa]	2,804	2,806
	$Q_1 [\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$	209,83	209,88
	$Q_2 [\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$	-209,83	-209,88
Monostack	P [Pa]	1,139	1,139
	$Q_1 [\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$	-13,670	-13,670
	$Q_2 [\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$	13,670	13,670
Monows	P [Pa]	13,879	13,879
	$Q_1 [\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$	513,670	513,670
	$Q_2 [\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$	-513,670	-513,670

Tableau 24 Résultats des solutions analytique et de COMFIE pour les configurations monozone testées

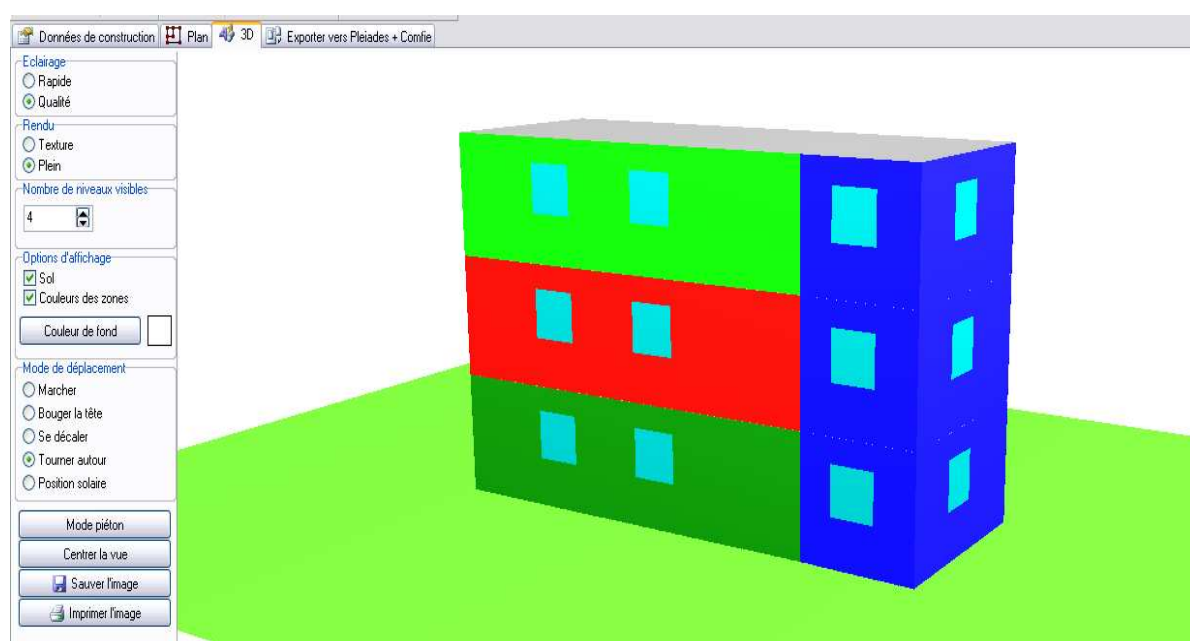
Dans les trois cas, on voit que les résultats obtenus par le logiciel sont en parfait accord avec les résultats analytiques.

III-3-2) COMPARAISON INTER-LOGICIELS

On reprend ici une étude ayant eu lieu dans le cadre de la validation de COMIS. Il s'agit d'une comparaison d'étude aéralique entre les logiciels COMIS, CONTAM, MZAP et BREEZE.



Le bâtiment considéré présente trois étages, reliés entre eux par un escalier fermé. Chaque étage a un volume de 150 m^3 et la cage d'escalier 135 m^3 . On fixe la température extérieure à 10°C et la vitesse du vent au site est de 2 m.s^{-1} . Les caractéristiques des connexions aéraliques (coefficient C, exposant n et Cp dans le cas d'un contact avec l'extérieur) sont présentées sur la Figure 38. La Figure 39 montre la saisie graphique du projet dans le logiciel Alcyone.



Les tableaux ci-dessous et la Figure 40 montrent les résultats des logiciels considérés. Les débits calculés par COMFIE sont confrontés à la moyenne des débits déterminés par les autres logiciels. Sur les dix connexions, neuf présentent un écart relatif inférieur à 2% entre ces deux valeurs. On retrouve un écart relatif plus élevé (+6,15%) sur la connexion présentant le débit le plus faible. Dans ce dernier cas, l'écart absolu reste cependant inférieur à la moyenne moins un écart type, la moyenne étant influencée par une valeur faible obtenue par un des logiciels (Breeze).

Connexions	COMIS	CONTAM	MZAP	BREEZE	Moyenne des débits (kg.h-1)
<i>a</i>	79,42	80,45	79,43	79,20	79,63
<i>b</i>	45,91	46,19	45,91	46,08	46,02
<i>c</i>	21,62	22,01	21,64	21,60	21,72
<i>d</i>	132,60	133,40	132,60	132,80	132,85
<i>e</i>	28,88	28,76	28,90	29,16	28,93
<i>f</i>	78,46	79,53	78,47	78,48	78,74
<i>g</i>	36,89	37,11	36,89	36,72	36,90
<i>h</i>	11,65	12,01	11,67	11,52	11,71
<i>i</i>	0,96	0,92	0,96	0,72	0,89
<i>j</i>	9,96	10,00	9,98	10,08	10,01
Total sortie	154,22	155,41	154,24	154,40	154,57

Tableau 25 Récapitulatif des résultats pour les principaux logiciels aérauliques [FURBRINGER & AL, 1996]

Connexions	Moyenne des débits (kg.h-1)	COMFIE	Ecart relatif
<i>a</i>	79,63	79,47	-0,20%
<i>b</i>	46,02	46,00	-0,05%
<i>c</i>	21,72	21,46	-1,17%
<i>d</i>	132,85	132,71	-0,10%
<i>e</i>	28,93	28,71	-0,75%
<i>f</i>	78,74	78,52	-0,27%
<i>g</i>	36,90	36,97	0,18%
<i>h</i>	11,71	11,49	-1,93%
<i>i</i>	0,89	0,94	6,15%
<i>j</i>	10,01	9,98	-0,28%
Total sortie	154,57	154,18	-0,25%

Tableau 26 Résultats de COMFIE et écart relatif par rapport à la moyenne des résultats des autres logiciels

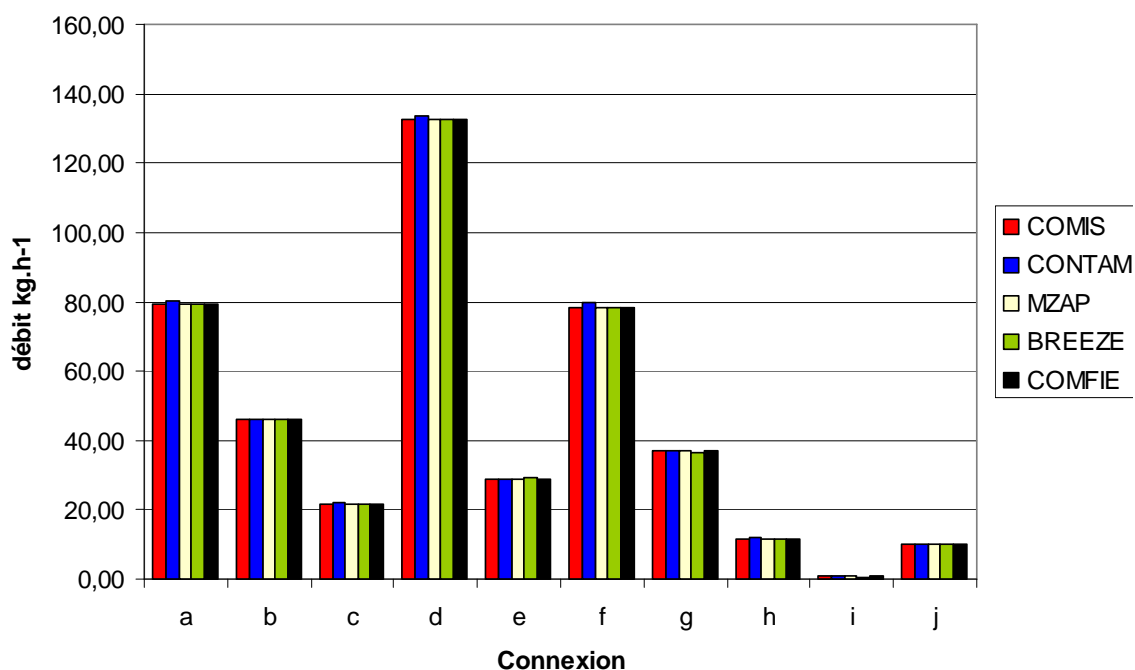


Figure 40 Débits d'air pour chaque connexions pour différents logiciels

III-3-3) COMPARAISON AVEC TRNFLOW

Dans cette partie, on conserve le projet présenté dans le paragraphe précédent (caractéristiques aérauliques exposées sur la Figure 38). Les températures de zone, précédemment fixes, sont à présent les valeurs des consignes des scénarii de température. On utilise ici le fichier météo de Trappes issu de la base Météonorm⁶. On prend ici en compte un cas sans vent.

Pour les caractéristiques thermiques des parois, on fixe les valeurs qui sont présentées dans le Tableau 27.

Paroi considérée	Coefficient de transmission thermique
Murs extérieurs	$U_{\text{outwall}} = 0,19 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
Plancher bas	$U_{\text{ground}} = 0,19 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
Plancher haut	$U_{\text{roof}} = 0,19 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Tableau 27 Caractéristiques thermiques des parois du projet

Les températures de consigne des zones 1, 2, 3 et 4 sont respectivement fixées à 18°C, 20°C, 23°C et 17°C.

Dans les sorties de TRNFLOW, il est possible de distinguer la part des besoins de chauffage due aux infiltrations d'air. Dans le cas de notre projet, on obtient les résultats présentés dans le Tableau 28.

⁶ Voir www.metenorm.com

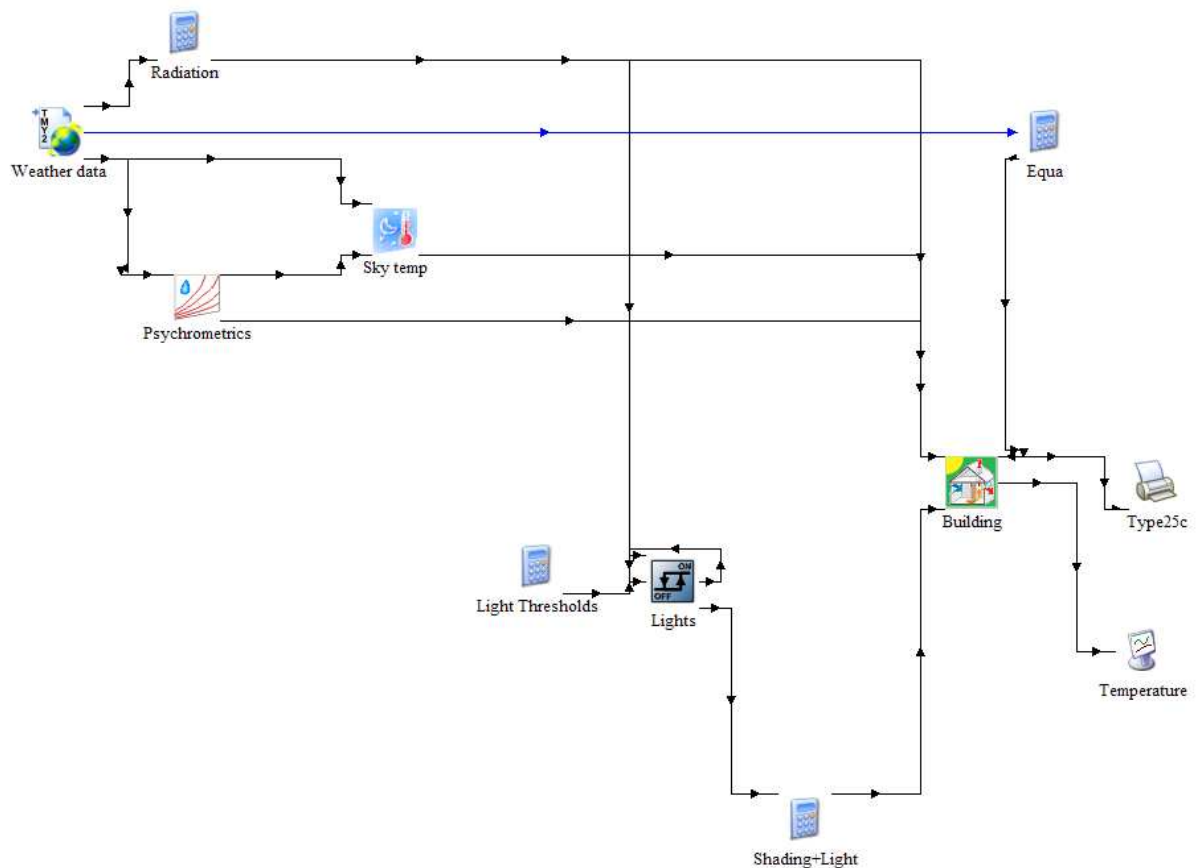


Figure 41 Interface (Simulation Studio) de TRNFLOW de saisie du projet dans l'interface

	TRNFLOW	COMFIE	Ecart relatif
Besoins annuels de chauffage hors infiltrations d'air	7040 kWh	6405 kWh	-9,02%
Besoins annuels de chauffage dus aux infiltrations d'air	4443 kWh	4719 kWh	+6,21%
Total	11490 kWh	10957 kWh	-4,64%

Tableau 28 Résultat des deux simulations

Dans le cas où les infiltrations d'air n'interviennent pas dans le bilan on retrouve un écart de 9,02% entre les besoins de chauffage calculés par les deux logiciels. Cet écart correspond à l'ordre de grandeur des écarts constatés entre plusieurs outils de simulation [PEUPORTIER, 2005].

En particulier, la température calculée par le modèle thermique est sensiblement supérieure à celle déterminée dans TRNFLOW sans le calcul aéraulique pour les zones 1 et 4. Cette élévation de température explique une évaluation plus importante (+6,21%) des besoins dus aux infiltrations d'air (la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur étant plus grande).

La comparaison des débits calculés par les deux modèles montre une concordance entre les valeurs calculées, ce qui peut être constaté sur les figures des pages 88 à 90.

Pour évaluer l'écart entre les débits calculés, il semble judicieux d'intégrer les résultats sur une année. Pour les dix connexions considérées, on trouve un faible écart relatif. L'écart maximum (-5,33%) est encore trouvé pour la connexion i présentant de faibles débits.

Connexions	Intégration des débits TRNFLOW(kg)	Intégration des débits COMFIE(kg)	Ecart relatif
<i>a</i>	-618064	-630286	1,98%
<i>b</i>	61081	61253	0,28%
<i>c</i>	577614	585808	1,42%
<i>d</i>	734550	749588	2,05%
<i>e</i>	-755183	-766364	1,48%
<i>f</i>	583355	597897	2,49%
<i>g</i>	-111682	-113210	1,37%
<i>h</i>	492310	501529	1,87%
<i>i</i>	34705	32855	-5,33%
<i>j</i>	85305	84186	-1,31%

Tableau 29 Ecart relatif entre TRNFLOW et COMFIE pour l'intégration des débits sur une année

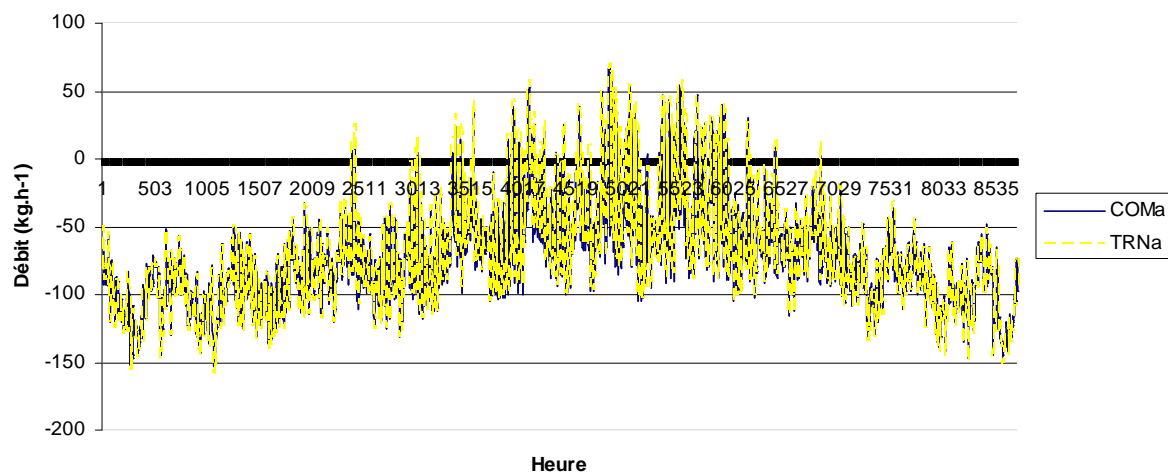


Figure 42 Comparaison des débits sur une année pour la connexion a

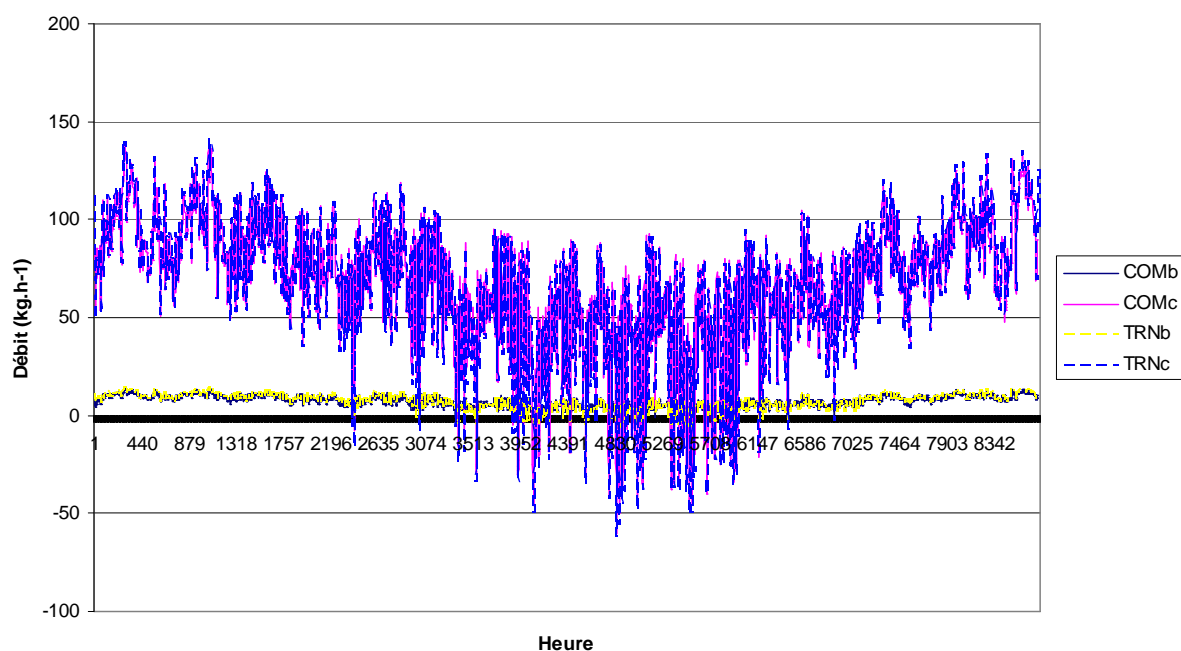


Figure 43 Comparaison des débits sur une année pour les connexions b et c

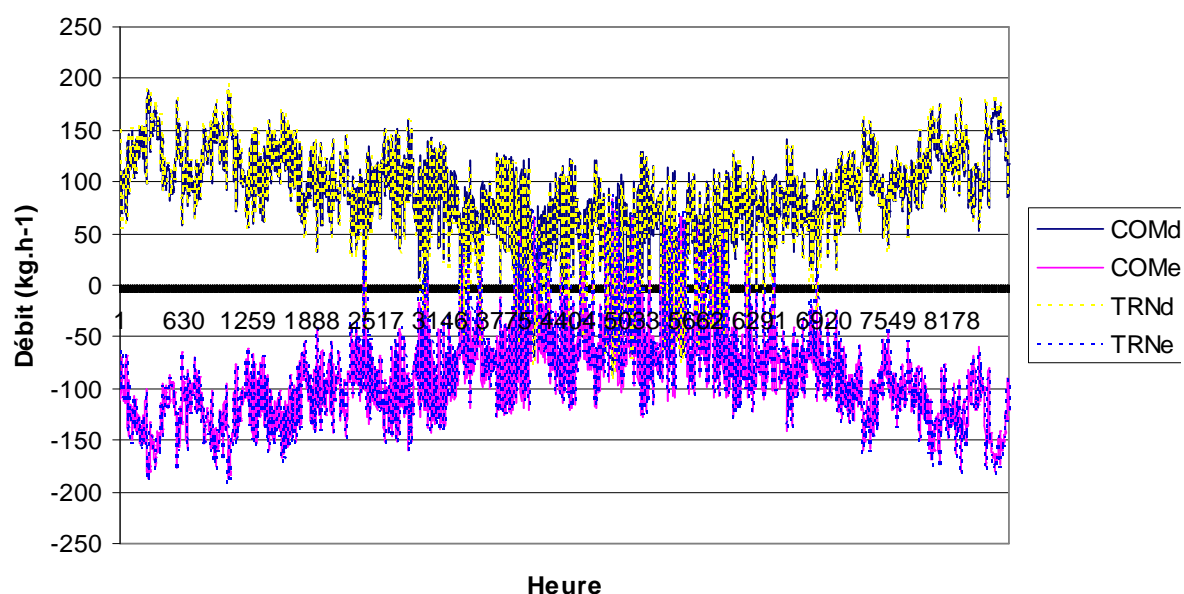


Figure 44 Comparaison des débits sur une année pour les connexions d et e

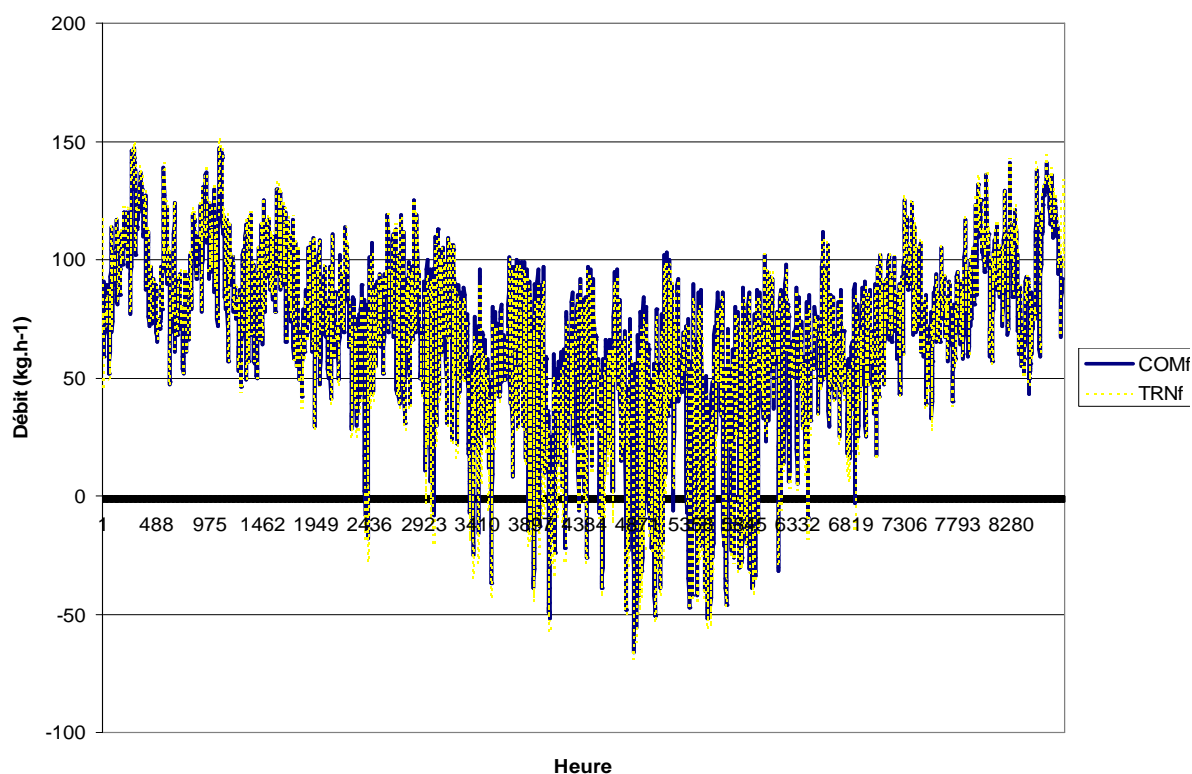


Figure 45 Comparaison des débits sur une année pour la connexion f

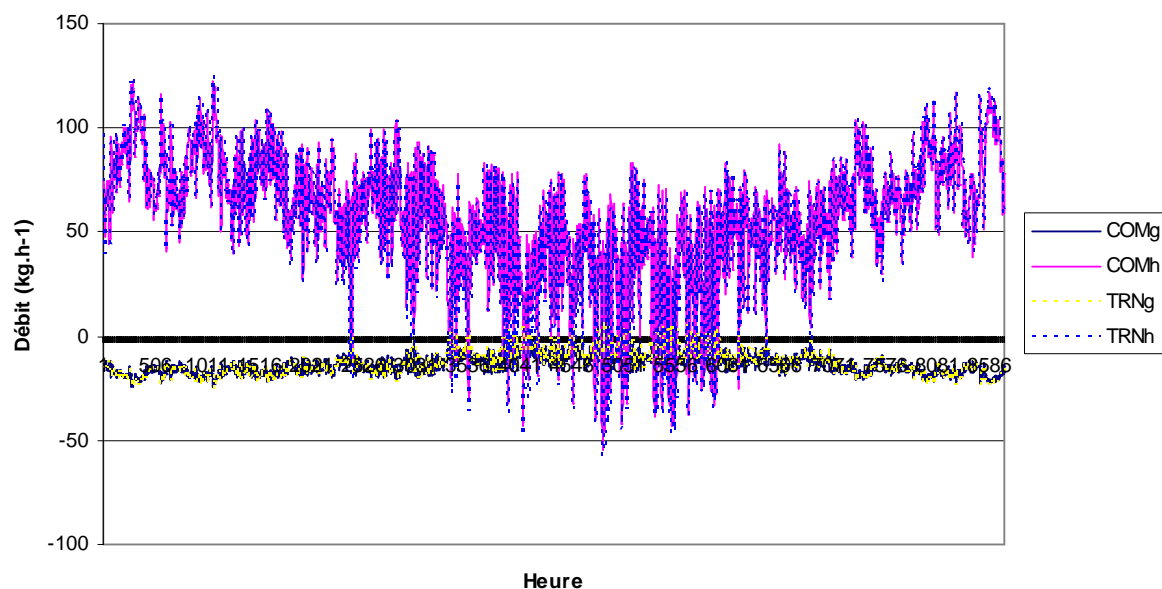


Figure 46 Comparaison des débits sur une année pour les connexions g et h

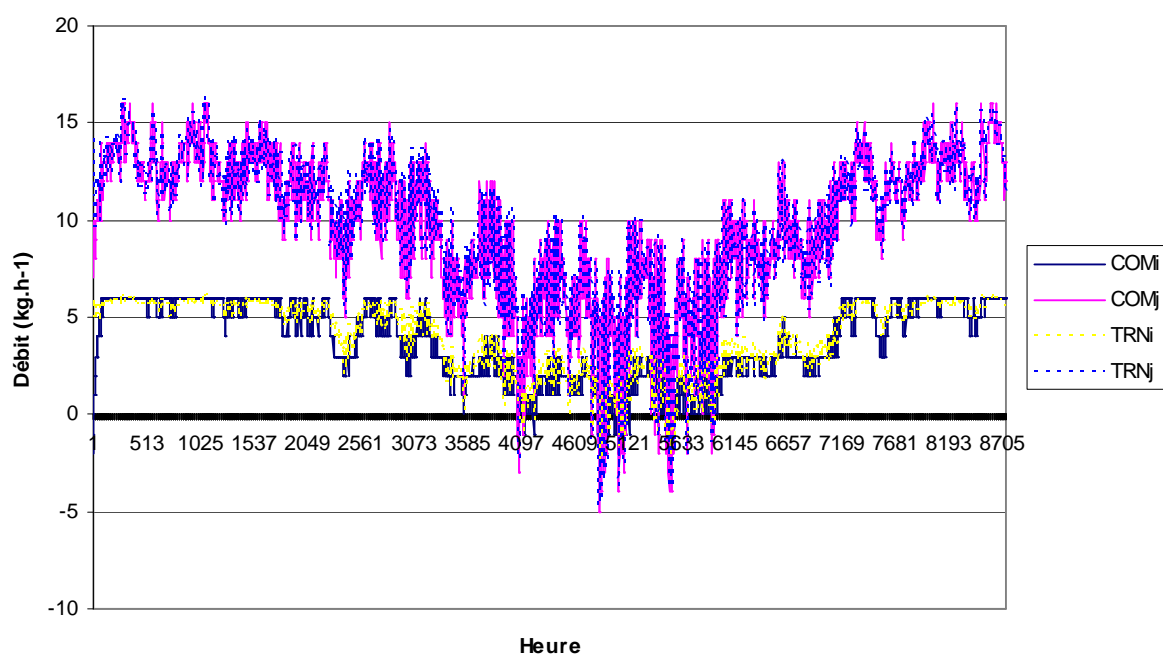


Figure 47 Comparaison des débits sur une année pour les connexions i et j

III-4) CONCLUSION

Le modèle aéraulique développé s'appuie sur une technique de modélisation multizone adaptée au problème traité. Il s'inscrit dans un outil et dans une démarche d'aide à la conception en facilitant la saisie pour l'utilisateur (tant au niveau de la répartition de l'étanchéité à l'air des façades que du scénario d'ouverture des ouvrants). Aussi, la confrontation avec des calculs analytiques et des logiciels validés par ailleurs montrent la cohérence des résultats obtenus, tant sur la partie aéraulique que sur le couplage entre les deux modèles.

Il serait néanmoins intéressant de valider le modèle par rapport à des cas réels dans le cadre d'un futur travail de recherche. Pour cela, il faudrait disposer d'un bâtiment test dont les caractéristiques thermiques des composants sont parfaitement connues et d'un enregistrement des sollicitations météorologiques sur le site regroupant les informations suivantes : température, rayonnement global et diffus, vitesse, direction du vent et fonctionnement du bâtiment sur la période de simulation.

Le travail de programmation informatique ayant permis son intégration dans le logiciel COMFIE, l'outil de simulation va maintenant pouvoir être appliqué dans le cadre d'une démarche de conception de bâtiments performants, tant sur le plan énergétique qu'environnemental.

CHAPITRE IV

DE LA CONCEPTION ÉNERGÉTIQUE À L'ÉCO- CONCEPTION : CHAINAGE ENTRE SIMULATION THERMIQUE ET ACV

Dans ce chapitre, on présente d'abord un outil d'Analyse de Cycle de Vie des bâtiments. Chaîné avec le modèle thermo-aéraulique présenté dans les chapitres précédents, il permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un projet.

Ensuite, à partir des données de la base EcoInvent 2007, on évalue les impacts engendrés par une plus grande étanchéité de la construction.

L'objectif est d'évaluer un bilan complet intégrant les impacts évités grâce aux économies d'énergie et les impacts supplémentaires liés aux composants mis en œuvre pour améliorer l'étanchéité de l'enveloppe.

IV-1) EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX D'UN BATIMENT PAR LA MÉTHODE D'ANALYSE DE CYCLE DE VIE : MÉTHODOLOGIE

IV-1-1) ANALYSE DE CYCLE DE VIE

Définition

L'analyse de cycle de vie est une méthode permettant d'évaluer la consommation en ressources et les impacts environnementaux d'un produit, d'un système ou d'un service de sa mise en œuvre à sa destruction (« du berceau à la tombe »). Cet outil permet d'aborder toutes les dimensions écologiques d'un système.

On utilise l'analyse du cycle de vie d'un système pour le comparer à d'autres, pour comparer les alternatives d'un projet, l'importance des différentes phases de son cycle de vie et pour comparer les résultats obtenus avec une référence.

Une telle analyse est adaptée aux phases de prises de décisions industrielles ou politiques. Les différents indicateurs d'impacts permettent une vision environnementale globale d'un système.

Les composants d'une ACV

D'après la norme ISO 14040 [ISO, 1997], une analyse de cycle de vie doit inclure quatre étapes :

- Définition des objectifs et du champ de l'étude ;
- Inventaire ;
- Analyse des impacts ;
- Interprétation des résultats.

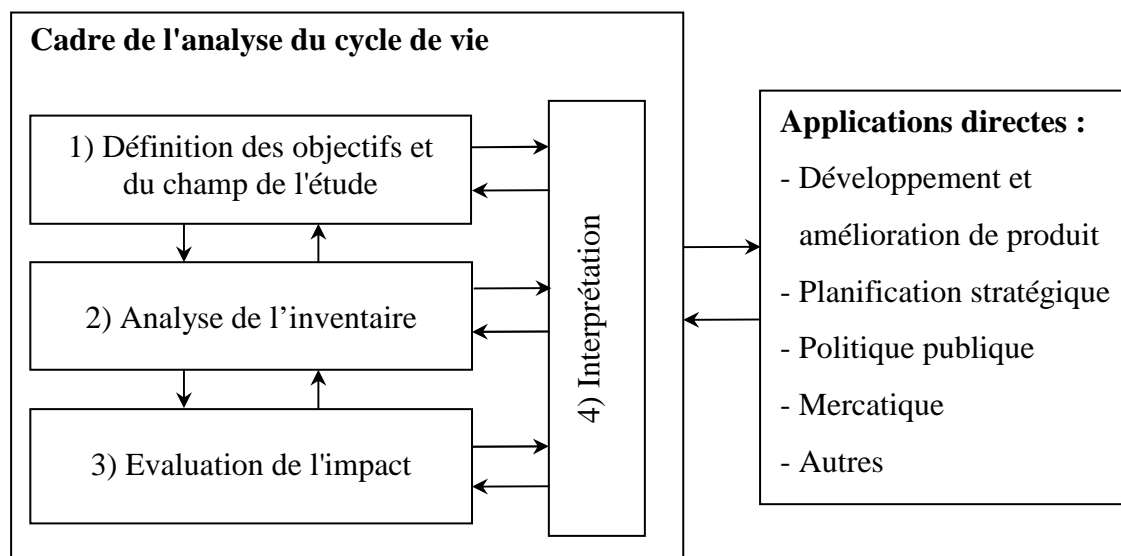


Figure 48 Phases d'une l'analyse du cycle de vie et ses applications.

Une ACV est un processus itératif (cf. Figure 48). La phase d'interprétation est omniprésente et elle peut entraîner à tout moment des changements dans le champ de l'étude et dans la façon de collecter les données de l'inventaire.

Définition des objectifs et du champ de l'étude

La définition des objectifs, [ISO, 1998], est une étape cruciale pour le bon déroulement de l'analyse. L'objectif de l'étude doit être clairement défini et compatible avec l'application prévue. La démarche n'aura pas le même degré de précision si on cherche à sensibiliser un public à l'environnement ou si on cherche le meilleur compromis technico-environnemental pour l'élaboration d'un bâtiment.

D'après la norme, le champ d'étude doit prendre en compte les critères suivants :

- ✓ Systèmes à étudier ;
- ✓ Fonctions de ces systèmes ;
- ✓ Unité fonctionnelle ;
- ✓ Frontières des systèmes étudiés ;
- ✓ Règles d'affectation ;
- ✓ Hypothèses ;
- ✓ Exigences sur les données de l'inventaire ;
- ✓ Limites du modèle ;
- ✓ Catégories d'impacts pris en compte.

L'unité fonctionnelle représente la référence à laquelle sont rapportées les quantités mentionnées dans l'inventaire. C'est un élément de mesure de la fonction remplie par le système. Elle comporte généralement trois unités : l'unité de produit, l'unité de service et l'unité de temps.

La référence que constitue une unité fonctionnelle est nécessaire pour pouvoir mener à bien une comparaison entre différentes études de cycle de vie.

Les frontières du système définissent les processus qui seront inclus dans le système à étudier. Certains flux élémentaires peuvent être exclus de l'étude car ils n'influencent pas de manière significative les conclusions de l'analyse (on ne prendra ainsi pas en compte les flux élémentaires nécessaires à la fabrication d'une pelleuse dans la phase de construction d'un bâtiment).

Inventaire

Il consiste en un bilan matière et énergie du système sur toute sa durée de vie. Sont ainsi mesurés d'après [ISO, 1998] :

- ✓ Flux de matière entrant : matières premières, matériaux et consommables ;
- ✓ Flux de matière sortant : co-produits, sous-produits, déchets liquides et solides, rejets dans l'air, dans l'eau et dans les sols ;
- ✓ Flux d'énergie entrant et sortant : énergie électrique, énergie thermique des différents combustibles, chaleur.

Les données qualitatives et quantitatives doivent être connues pour tous les procédés inclus dans un système. Ainsi, l'impact lié à la consommation d'électricité doit prendre en compte les différentes origines de la production électrique (nucléaire, gaz, charbon, renouvelables...). Dans chaque cas on doit prendre en compte les procédés d'extraction de matière, de transport, de la conversion en énergie et du réseau de transport de l'électricité.

Dans le but d'être adaptées à l'unité fonctionnelle les entrées et sorties de chaque procédé sont transformées à l'échelle de cette unité fonctionnelle. Si un bâtiment contient 1000 kg de tuiles que les informations dont on dispose nous donnent les flux élémentaires nécessaires à la fabrication d'1 kg de tuile, il faudra multiplier tous les flux par 1000.

Analyse des impacts

L'inventaire est un outil lourd à gérer du fait de la multitude des flux. En outre, il les recense mais n'informe pas sur leurs impacts sur l'environnement. La phase d'analyse des impacts a pour but de mieux comprendre la signification environnementale de l'inventaire.

La démarche retenue par la norme ISO 14043, [ISO, 2000A] est la suivante :

- a. **Sélection des catégories d'impact, des indicateurs et des modèles de caractérisation**
La sélection des catégories d'impact, des indicateurs et des modèles de caractérisation doit être cohérente avec les objectifs de l'étude. Dans la plupart des ACV, on choisit des modèles existants (comme EcoIndicator ou IPCC).
- b. **Classification**
Cette étape a pour but d'assigner un flux à une catégorie d'impact. On peut noter que certains flux élémentaires peuvent être assignés à plusieurs catégories d'impact. Ainsi les CFC prennent part au changement climatique mais aussi à la détérioration de la couche d'ozone.
- c. **Caractérisation**
A l'aide de facteurs de caractérisation, les sorties de l'inventaire sont converties en indicateurs numériques (t eq CO₂ , kg eq PO₄...).
- d. **Normalisation**
Quelle impact environnemental faut-il traiter en priorité dans un projet ? La quantité de CO₂ émise exprimée en t eq CO₂ ? La quantité d'énergie primaire consommée exprimée en GJ ? La consommation d'eau en m³ ? Cette étape (facultative dans la norme) permet d'afficher les résultats dans la même échelle. Il est préférable que cette nouvelle échelle se base sur des données temporelles et spatiales, par exemple l'année-habitant spécifique à un pays.

Le Tableau 30 illustre le cas d'un procédé qui dégagerait 7 tonnes de CO₂ et 1 tonne de CH₄. Les facteurs de caractérisation sont donnés d'après la méthode Intergovernmental Panel on Climate Change 2001 (IPCC 2001).

Inventaire	7 t CO ₂	1 t CH ₄
Classification	Changement climatique (IPCC 2007)	
Facteur de caractérisation	1 t CO ₂ = 1 t eq CO ₂	1 t CH ₄ = 25 t eq CO ₂
Caractérisation	7x1 + 1x25 = 32 t eq CO ₂	
Facteur de normalisation	8 t eq CO ₂ / an / habitant en France	
Normalisation	4 Années-Habitant en France	

Tableau 30 Exemple simple d'analyse d'impact.

Interprétation des résultats

L'interprétation est la phase finale de l'ACV [ISO, 2000B], elle permet de résumer et d'analyser les résultats de l'étude pour établir des conclusions et aider à la prise de décision en réponse aux objectifs fixés lors de la première étape. Il est primordial de noter que l'interprétation des résultats ne peut se faire qu'en tenant compte des hypothèses et du champ de l'étude. Si il n'est pas possible de répondre aux objectifs fixés, ces derniers doivent être redéfinis dans le cadre de la première étape de l'ACV.

Limites

La méthode d'Analyse de Cycle de vie présente plusieurs limites. Elle repose d'abord sur la définition des objectifs du champ de l'étude, cette définition peut parfois être subjective (sélection des frontières du système, des données utilisées...).

Ensuite, la qualité de l'ACV dépend de l'accessibilité et de la qualité des données d'inventaires. Cette méthodologie étant récente, il arrive de trouver des erreurs dans certains inventaires (la base de données utilisée contient des milliers de références contenant elles-mêmes des milliers de flux élémentaires) ou de ne pas en trouver qui correspondent pleinement à tous les critères (localisation géographique, méthode de calcul...).

Au niveau des indicateurs, la plupart des modèles de caractérisation sont basés sur des effets potentiels, ils ne correspondent donc pas à un impact réel mesurable. Par exemple, il n'est pas possible aujourd'hui d'évaluer les conséquences des émissions de gaz à effet de serre en terme de tempêtes, inondations, etc. Un indicateur de potentiel de réchauffement global est alors évalué permettant d'appliquer le principe de précaution.

IV-1-2) MODÉLISATION D'UN BÂTIMENT

Un bâtiment possède deux types de frontières. La frontière « physique » qui comprend tous ses éléments. On parle aussi de frontière « flux » qui doit contenir les procédés amont (production d'énergie, traitement des eaux, fabrication et transport des matériaux de construction) et aval (gestion des déchets, des eaux usées...) [POPOVICI, 2006]. La définition de cette frontière permet au système d'interagir avec l'environnement extérieur via des flux élémentaires :

- ✓ **Flux de ressources** : eau, énergie, matières premières ;
- ✓ **Emissions** : gazeuses, liquides, solides.

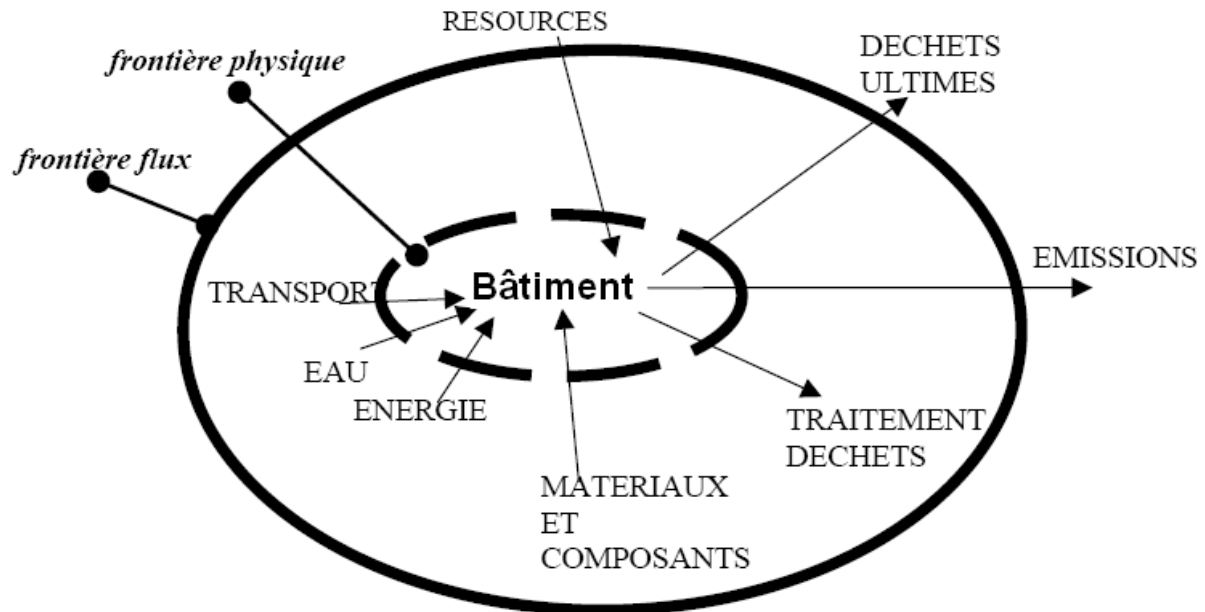


Figure 49 Frontières du système étudié

Selon la méthodologie de l'ACV, les substances puisées et émises dans l'environnement sont comptabilisées (phase d'inventaire) puis des indicateurs environnementaux sont déduits pour les quatre phases du cycle de vie du quartier :

- ✓ **Construction** : extraction des matières premières, production et transport des matériaux, chantier ;
- ✓ **Utilisation** : chauffage, éventuellement climatisation, consommation d'eau, etc. ;
- ✓ **Rénovation** : remplacement des composants (fenêtres, revêtements des bâtiments et des rues) ;
- ✓ **Démolition** : y compris transport et traitement des déchets.

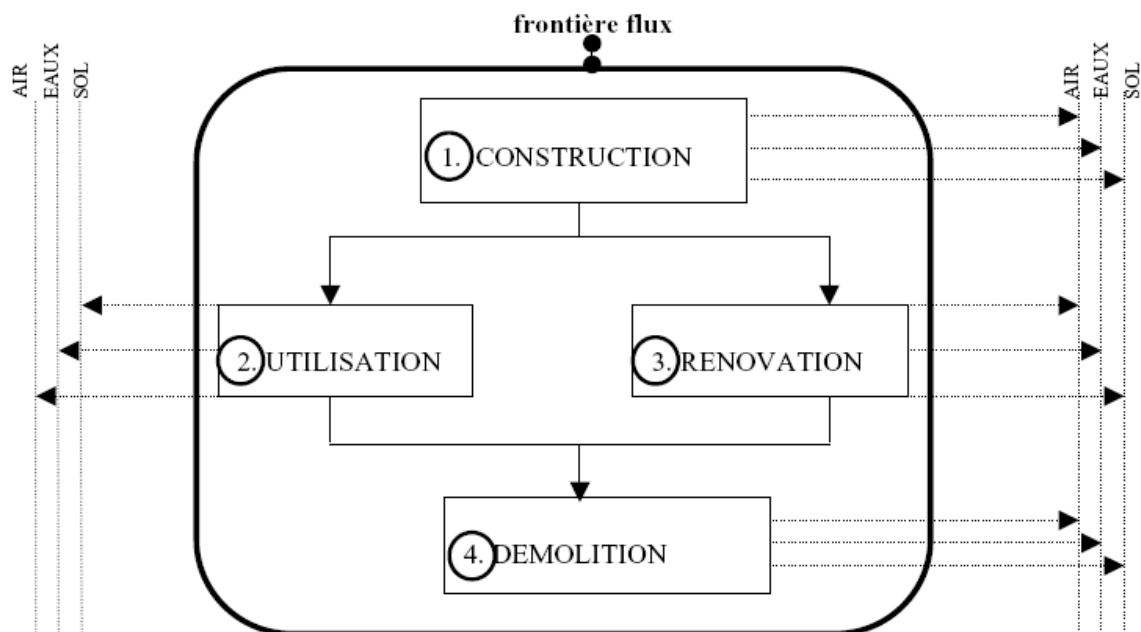


Figure 50 Modélisation de l'ACV d'un bâtiment

Il convient également de tenir compte des aspects liés au comportement des résidents (consommation d'eau et d'énergie, traitement des déchets, pourcentage de tri et de recyclage, etc.) et des caractéristiques du site (distances de transport, climat, énergies utilisées pour la production d'électricité et de chauffage urbain, etc.).

La simulation du cycle de vie est effectuée sur une période d'analyse, qui peut correspondre à la durée de vie supposée d'un bâtiment (par exemple 80 ans), en utilisant un pas de temps annuel.

IV-1-3) LE LOGICIEL EQUER

Le logiciel EQUER a été développé au Centre Energétique et Procédés de MINES ParisTech par [POLSTER, 1995]. Il s'agit d'un outil d'analyse de cycle de vie des bâtiments.

Chaîné à COMFIE, il récupère la plupart des informations relatives au bâtiment étudié : types et quantités de matériaux, consommations d'énergie électrique spécifique, de chauffage et de climatisation.

D'autres informations sont renseignées dans le logiciel :

- ✓ La consommation d'eau chaude et eau froide par jour et par habitant, associées à un rendement de réseau d'eau.
- ✓ Le type d'énergie utilisé pour le chauffage et un mix énergétique pour la production d'électricité (par exemple, le mix par défaut pour la France est de 78% d'électricité d'origine nucléaire, 14% d'hydroélectrique, 4% de gaz et 4% de charbon avec des pertes en ligne de 9%) ;
- ✓ Les transports (notamment si l'objectif de l'étude est de choisir entre plusieurs emplacements possibles de construction) ;
- ✓ L'existence de pratique de valorisation des déchets (tri sélectifs ou valorisation à l'incinération).

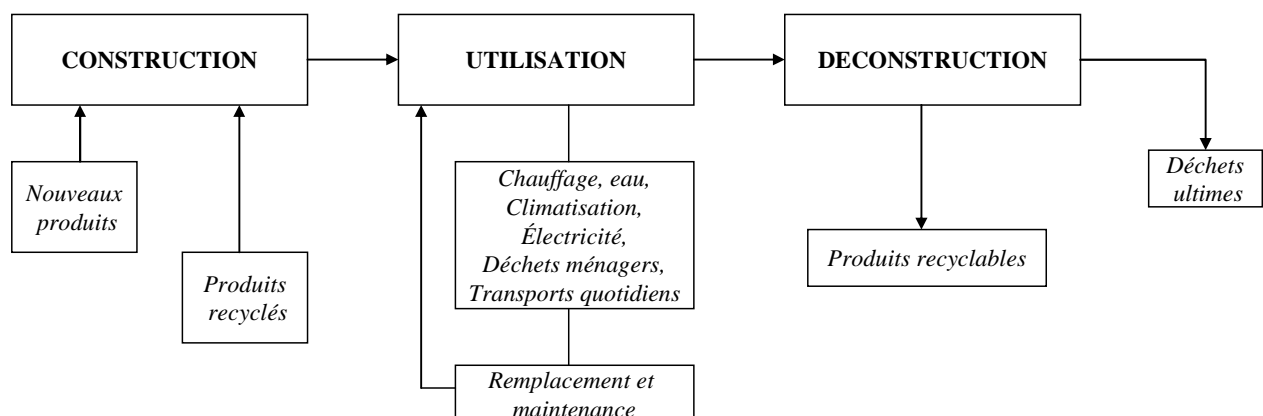


Figure 51 Cycle de vie simulé dans EQUER

Dans Equer, le bâtiment est représenté comme une structure d'objet. Le calcul des inventaires est effectué grâce aux méthodes associées à chaque objet selon les procédures de simulation présentées à la Figure 51. Le bâtiment est simulé sur la phase d'utilisation sur un pas de temps

d'un an. Le remplacement des composants ou de leur constituants est effectué automatiquement grâce à des compteurs d'âge inclus dans les objets.

IV-1-4) INDICATEURS CONSIDÉRÉS

Les sorties du logiciel sont 12 indicateurs correspondant aux problèmes environnementaux actuels (réchauffement climatique, épuisement des ressources, génération de déchets, pollution de l'eau, effets sur la santé humaine, etc.). Issus de la version 2007 de la base de donnée EcoInvent [FRISCHKNECHT & AL, 2007], les indicateurs considérés sont les suivants :

✓ Demande cumulative en énergie [GJ] [GUINÉE & AL, 2001] :

L'indicateur CED (Cumulative Energy Demand), représente l'énergie primaire consommée au cours de la vie d'un bien ou d'un service. On choisit ici l'énergie primaire pour prendre en compte les différents types d'énergies (électricité, chaleur) distribués sur une base homogène. En effet, la production d'1 kWh d'électricité nécessite davantage d'énergie primaire que la production d'1 kWh de chaleur.

Cinq sortes sont ici prises en compte : les énergies fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole), nucléaire, biomasse, hydraulique et autres types d'énergies renouvelables (géothermie, éolien et solaire). En ce qui concerne l'énergie fossile, on prend en compte le PCS (Pouvoir Calorifique Supérieur) des ressources (MJ.kg^{-1} ou MJ.m^{-3}). Pour le nucléaire, le concept de PCS est généralisé en considérant l'énergie maximale qui peut être produite par 1 kg d'uranium. Pour les énergies renouvelables on prend en compte l'énergie extraite de chaque source (énergie potentielle de l'eau pour un barrage, rayonnement solaire capté pour l'énergie solaire). La demande cumulative en énergie des énergies renouvelables limitées en flux (hydro-électricité, biomasse, géothermie) est considérée.

✓ Eau utilisée [m^3] :

Cet indicateur, constitué à partir des inventaires fournis par EcoInvent représente la quantité d'eau douce puisée par le bâtiment en m^3 .

✓ Epuisement des ressources abiotiques [kg Antimoine eq.] [GUINÉE & AL, 2001] :

Cet indicateur témoigne de l'appauvrissement de l'environnement en ressources minérales et fossiles. Sont exclues ici les ressources vivantes et leurs impacts associés tels que la disparition d'espèces ou la perte de biodiversité. Cet indicateur renseigne sur l'appauvrissement de différentes matières, pas sur l'impact causé par leur extraction du milieu naturel. Le calcul se fait par rapport aux stocks estimés restant et au taux de consommation de l'économie actuelle.

✓ Déchets produits [t] :

Cet indicateur, constitué à partir des inventaires fournis par EcoInvent nous montre la quantité de déchets ultimes générés par le bâtiment. Ils se décomposent en trois catégories : déchets inertes, dangereux et non dangereux. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables

et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

✓ **Déchets radioactifs [dm^3] :**

Il existe plusieurs sortes de déchets radioactifs si on prend en compte leur activité et leur durée de confinement. Les déchets de catégorie A (faible et moyenne activité) sont destinés à être stockés environ 300 ans. Les déchets de catégorie B (faible et moyenne activité contenant des éléments à très longue période) et les déchets de catégorie C (haute activité) doivent rester confinés des milliers d'années. Dans cet indicateur, on additionne toutes les sortes de déchets afin d'exprimer le volume nécessaire au stockage des déchets radioactifs.

✓ **Acidification [$\text{kg SO}_2 \text{ eq.}$] [GUINÉE & AL, 2001] :**

Cet indicateur correspond au problème des pluies acides et au dépérissement des forêts. Comme pour le réchauffement climatique, on parle ici aussi de potentiel d'acidification d'une substance (AP pour Acidification Potential).

✓ **Eutrophisation [$\text{kg PO}_4 \text{ eq.}$] [GUINÉE & AL, 2001] :**

L'eutrophisation est un phénomène lié à l'apport de substances (surtout nitrates et phosphates) jouant le rôle d'engrais dans les eaux de surface. Ces engrais favorisent l'apparition et le développement d'algues dont la décomposition appauvrit les milieux aquatiques en oxygène ce qui peut entraîner la mort des poissons et d'autres organismes vivants.

✓ **Effet de serre [$\text{t CO}_2 \text{ eq.}$] [HOUGHTON, 2001] :**

Les différents gaz à effet de serre possèdent un potentiel de réchauffement (GWP pour Global Warming Potential) donné par le modèle IPCC 2001 (la base utilisée ne dispose pas encore des données de IPCC 2007). On considère ici le GWP sur une période de 100 ans.

✓ **Dommage à la qualité des écosystèmes dus à l'écotoxicité [$\text{PDF} \times \text{m}^2 \times \text{an}$] [GOEDKOOP & SPRIENSMA, 2000] :**

Cet indicateur témoigne du dommage final subi par la nature en terme d'atteinte à la biodiversité. Il s'exprime en PDF (Potentially Disappeared Fraction of Species) $\times \text{m}^2 \times \text{an}$, il illustre ainsi le nombre d'espèces ayant une forte probabilité de disparaître à un endroit donné et sur une certaine durée à cause de conditions écologiques défavorables.

	Unit	global warming potential 100a 2001 kg CO ₂ -equiv.
Ammonia (NH ₃)	kg	
Butane (C ₄ H ₁₀)	kg	3
Carbon dioxide (CO ₂)	kg	1
Carbon monoxide (CO)	kg	1.58
Chloroform (CHCl ₃)	kg	4
Dinitrogen monoxide (N ₂ O)	kg	296
Ethane, 1,1,1-trichloro- (C ₂ H ₃ Cl ₃ , HCFC-140)	kg	-204
Ethane, 1,1,1-trifluoro- (C ₂ H ₃ F ₃ , CFC-143a)	kg	4300
Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro- (C ₂ Cl ₃ F ₃ , CFC-113)	kg	3060
Ethane, 1,1-dichloro-1-fluoro- (C ₂ H ₃ Cl ₂ F, HCFC-141b)	kg	250
Ethane, 1,1-difluoro- (C ₂ H ₄ F ₂ , HFC-152a)	kg	120
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro- (C ₂ Cl ₂ F ₄ , CFC-114)	kg	5690
Ethane, 1-chloro-1,1-difluoro- (C ₂ H ₃ ClF ₂ , HCFC-142)	kg	1650
Ethane, 2,2-dichloro-1,1,1-tri-fluoro- (C ₂ HCl ₂ F ₃ , HCFC-123)	kg	32
Ethane, 2-chloro-1,1,1,2-tetra-fluoro- (C ₂ HClF ₄ , HCFC-124)	kg	410
Ethane, chloropentafluoro- (C ₂ ClF ₅ , CFC-115)	kg	5690
Ethane, hexafluoro- (C ₂ F ₆ , HFC-116)	kg	11900
Ethane, pentafluoro- (C ₂ H ₂ F ₅ , HFC-125)	kg	3400
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro- (C ₂ H ₂ F ₄ , HFC-134a)	kg	1300
Hydrochlorofluorocarbon (HCFC-R502)	kg	3570
Hydrofluorocarbon (HFC-Isceon 58)	kg	1050
Hydrofluorocarbon (HFC-R404A)	kg	3260
Hydrofluorocarbon (HFC-R407C)	kg	1530
Hydrofluorocarbon (HFC-R410A)	kg	1730
Methane (CH ₄)	kg	23
Methane, bromochlorodifluoro- (CBrClF ₂ , Halon 1211)	kg	1300
Methane, bromotrifluoro- (CBrF ₃ , Halon 1301)	kg	-34700
Methane, chlorodifluoro- (CHClF ₂ , HCFC-22)	kg	1350
Methane, chlorotrifluoro- (CClF ₃ , CFC-13)	kg	9130
Methane, dichloro- (CH ₂ Cl ₂ , HCC-30)	kg	9
Methane, dichlorodifluoro- (CCl ₂ F ₂ , CFC-12)	kg	6640
Methane, dichlorofluoro- (CHCl ₂ F, HCFC-21)	kg	210
Methane, difluoro- (CH ₂ F ₂ , HFC-32)	kg	550
Methane, tetrachloro- (CCl ₄ , CFC-10)	kg	-1530
Methane, tetrafluoro- (CF ₄ , FC-14)	kg	5700
Methane, trichlorofluoro- (CCl ₃ F, CFC-11)	kg	1070
Methane, trifluoro- (CHF ₃ , HFC-23)	kg	12000
Nitrogen oxides (NO _x as NO ₂)	kg	
Propane (C ₃ H ₈)	kg	3
Sulfur hexafluoride (SF ₆)	kg	22200

Tableau 31 Potentiels de réchauffement des principaux GES

✓ **Domage à la santé [DALY] [GOEDKOOP & SPRIENSMA, 2000] :**

On parle ici du dommage final à la santé humaine exprimé en DALY (Disability Adjusted Life Year). Cet indicateur témoigne de la durée de vie en bonne santé qui a été perdue. Le DALY comprend les années perdues par mort prématurée et les années vécues avec une incapacité.

✓ **Formation d'ozone photochimique (« smog d'été ») [kg C₂H₄ eq.] [GUINÉE & AL, 2001] :**

Certains composés organiques volatils (COV) se décomposent sous l'action du soleil et contribuent à la formation d'ozone, ce qui produit des effets sur les voies respiratoires. En

fonction des conditions climatiques, certaines villes imposent une limitation du trafic routier lors des pics d'ozone afin de limiter le phénomène de "smog".

✓ **Odeur [m3 air] [GUINÉE & AL, 2001] :**

Le seuil de détection d'une odeur est défini comme la concentration telle que 50% d'un échantillon représentatif détecte le produit. On détermine le volume critique d'odeur en divisant les émissions par cette concentration seuil. L'indicateur est exprimé en m³ d'air malodorant.

IV-2) IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX LIÉS À L'ÉTANCHÉITÉ

Les retours sur la démarche à mettre en œuvre dans le but de présenter un bâtiment étanche à l'air montrent qu'il s'agit de respecter une démarche de qualité dans toute la chaîne de décision qui aboutira à la création du bâtiment. Cette démarche doit être présente dès la conception du projet (par les préconisations et carnets de détails), puis pendant son exécution et enfin à sa réception (contrôle de la performance).

Pendant l'exécution, certains matériaux doivent être mis en œuvre pour assurer la bonne étanchéité des différents points critiques de l'enveloppe.

En se basant sur les préconisations techniques pour les bâtiments en maçonnerie ou en béton du projet PREBAT MININFIL et de [FFB, 2003], on présente dans ce paragraphe, les données d'ACV des matériaux étanchéifiants les plus communs. Les inventaires et les impacts environnementaux déduits sont issus de la base de données EcoInvent 2007.

IV-2-1) JOINTS

Joint mastic acrylique

L'utilisation de joint mastic acrylique est largement répandue, notamment pour les finitions et les joints intérieurs et extérieurs. Cette technique permet de raccorder entre eux des matériaux de constitution différente, il permet donc l'étanchéité de différentes interfaces comme menuiserie/isolant, isolant/isolant, etc.

Dans le Tableau 32, on trouve les impacts, (en prenant une masse volumique de 1,55 kg.m⁻³), on obtient des résultats au mètre linéaire pour différentes sections de joints à partir des données d'EcoInvent.

Indicateur	Unité	1 m (section 10x10mm)	1 m (section 15x8mm)	1 m (section 20x10mm)
GWP100	kg CO2 eq.	0,06327255	0,07592706	0,011768694
acidification	kg SO2 eq.	0,00028937	0,000347243	5,38227E-05
énergie	MJ	1,688929601	2,026715521	0,314140906
eau	l	0,71573885	0,85888662	0,133127426
déchets	kg eq.	0,020596973	0,024716368	0,003831037
ressources	kg antimoine eq.	0,000744574	0,000893488	0,000138491
eutrophisation	kg PO4	2,63361E-05	3,16033E-05	4,89851E-06
O3-smog	kg C2H4	2,66755E-05	3,20106E-05	4,96164E-06
écotoxicité	PDF*year*m ²	0,001461923	0,001754308	0,000271918
déchets rad.	m3	6,23663E-10	7,48395E-10	1,16001E-10
santé humaine	DALY	5,60181E-08	6,72217E-08	1,04194E-08
odeurs	m3	1195,081	1434,0972	222,285066

Tableau 32 Impacts environnementaux générés par les joints mastic acrylique

Joint PVC souples

Les joints PVC souples sont destinés aux liaisons entre les ouvertures (ouvrants, trappes, etc.) et le bâtiment. L'étanchéité à l'air est assurée quand le joint est mis en compression par le système de fermeture : on parle de protections d'angles. Les impacts environnementaux par m linéaire sont indiqués dans le Tableau 33.

Indicateur	Unité	1 m
GWP100	kg CO2 eq.	0,021539301
acidification	kg SO2 eq.	6,21968E-05
énergie	MJ	0,652808941
eau	l	0,099197938
déchets	kg eq.	0,000407006
ressources	kg antimoine eq.	0,000248583
eutrophisation	kg PO4	7,84609E-06
O3-smog	kg C2H4	3,42899E-06
écotoxicité	PDF*year*m ²	0,000204133
déchets rad.	m3	2,95079E-12
santé humaine	DALY	1,30209E-08
odeurs	m3	7,5079284

Tableau 33 Impacts environnementaux générés par les joints PVC

IV-2-2) MOUSSES (POLYURÉTHANNE ET POLYÉTHYLENE)

Les mousses de polyuréthane et polyéthylène sont utilisées comme fond de joint, c'est-à-dire comme support au mastic d'étanchéité.

La mousse de polyuréthane est aussi utilisée pour calfeutrer des traversées de gaines techniques.

D'après les inventaires d'EcoInvent, on déduit les impacts environnementaux présentés dans les tableaux ci-dessous pour différentes sections de matériaux.

Indicateur	Unité	1 m (diamètre 10mm)	1 m (diamètre 15mm)	1 m (diamètre 20mm)
GWP100	kg CO2 eq.	0,005836852	0,013132917	0,023347407
acidification	kg SO2 eq.	1,76353E-05	3,96793E-05	7,0541E-05
énergie	MJ	0,192764531	0,433720195	0,771058124
eau	l	0,012810581	0,028823806	0,051242322
déchets	kg eq.	0,000543905	0,001223786	0,002175619
ressources	kg antimoine eq.	8,30585E-05	0,000186882	0,000332234
eutrophisation	kg PO4	1,40943E-06	3,17122E-06	5,63773E-06
O3-smog	kg C2H4	1,55867E-06	3,50701E-06	6,23468E-06
écotoxicité	PDF*year*m ²	3,96721E-05	8,92622E-05	0,000158688
déchets rad.	m3	1,35524E-11	3,0493E-11	5,42098E-11
santé humaine	DALY	3,49989E-09	7,87474E-09	1,39995E-08
odeurs	m3	17,4262621	39,20908973	69,7050484

Tableau 34 Impacts environnementaux générés par la mousse polyéthylène

Indicateur	Unité	1 m (section 10x10mm)	1 m (section 15x8mm)	1 m (section 20x10mm)
GWP100	kg CO2 eq.	0,008419	0,0101028	0,016838
acidification	kg SO2 eq.	0,000034766	4,17192E-05	0,000069532
énergie	MJ	0,2036154	0,24433848	0,4072308
eau	l	0,153243537	0,183892244	0,306487074
déchets	kg eq.	0,000651026	0,000781231	0,001302052
ressources	kg antimoine eq.	0,000086174	0,000103409	0,000172348
eutrophisation	kg PO4	5,2644E-06	6,31728E-06	1,05288E-05
O3-smog	kg C2H4	4,1048E-06	4,92576E-06	8,2096E-06
écotoxicité	PDF*year*m ²	7,79221E-05	9,35065E-05	0,000155844
déchets rad.	m3	1,90428E-11	2,28514E-11	3,80856E-11
santé humaine	DALY	7,72772E-09	9,27326E-09	1,54554E-08
odeurs	m3	7,9664	9,55968	15,9328

Tableau 35 Impacts environnementaux générés par la mousse polyuréthane

IV-2-3) BANDES

Bande adhésive

Les bandes adhésives assurent une continuité d'étanchéité pour certaines interfaces de matériaux (par exemple nu du mur et isolant dans le cas de l'isolation intérieure ou l'interface entre le mur et une traversée technique).

Membrane polyester

La membrane en polyester permet d'assurer l'étanchéité de la liaison menuiserie/mur de maçonnerie. On la dispose autour de la menuiserie.

Le Tableau 36 donne les impacts environnementaux par m linéaire de membrane polyester et de ruban adhésif.

Indicateur	Unité	1 m ruban adhésif	1 m membrane polyester
GWP100	kg CO2 eq.	0,009202875	0,05398992
acidification	kg SO2 eq.	3,62837E-05	0,000134554
énergie	MJ	0,313119413	0,879999337
eau	l	0,046541514	0,284787
déchets	kg eq.	0,002245504	0,009599031
ressources	kg antimoine eq.	0,00013308	0,00038677
eutrophisation	kg PO4	2,95444E-06	2,82578E-05
O3-smog	kg C2H4	2,06621E-06	1,36397E-05
écotoxicité	PDF*year*m ²	0,000166684	0,00111556
déchets rad.	m3	1,01648E-10	3,81218E-10
santé humaine	DALY	7,62973E-09	3,07886E-08
odeurs	m3	41,15505	1522,368

Tableau 36 Impacts environnementaux générés par les rubans adhésif et membranes polyester

IV-2-4) ENDUITS

Dans le cas d'un bâtiment en maçonnerie, l'étanchéité à l'air des parois courantes est assurée par un enduit d'étanchéité, en plâtre, en ciment ou en chaux. Le tableau suivant indique les impacts environnementaux de ces produits par m² d'enduit (on considère un enduit de 10 mm d'épaisseur).

Indicateur	Unité	1 m ² chaux	1 m ² plâtre	1 m ² ciment
GWP100	kg CO2 eq.	13,77544	2,9778	2,66364
acidification	kg SO2 eq.	0,01243144	0,00539952	0,00497952
énergie	MJ	76,61586394	21,99358002	19,99970002
eau	l	9,94240338	26,746006	26,68113
déchets	kg eq.	0,134325575	0,241034535	0,233546726
ressources	kg antimoine eq.	0,0313908	0,00766514	0,00685636
eutrophisation	kg PO4	0,001260966	0,00071421	0,00066003
O3-smog	kg C2H4	0,0023184	0,000226464	0,000178472
écotoxicité	PDF*year*m ²	0,011312009	0,019825911	0,019240578
déchets rad.	m3	2,94984E-08	2,31165E-08	2,24043E-08
santé humaine	DALY	5,11371E-06	1,46155E-06	1,3268E-06
odeurs	m3	4658,92	7037,66	5717,88

Tableau 37 Impacts environnementaux générés par les enduits chaux, plâtre et ciment

IV-3) CONCLUSION

Dans cette partie, on a complété un outil d'analyse de cycle de vie des bâtiments avec des données relatives à la problématique de l'étanchéité à l'air. On dispose ainsi des impacts environnementaux supplémentaires générés à la construction pour étanchéifier le bâtiment. La prise en compte de cette problématique dans le modèle thermique permet aussi de disposer des consommations énergétiques correspondant à différents niveaux d'étanchéité de l'enveloppe.

L'outil ainsi développé sera utilisé dans le chapitre V dans le cadre de l'éco-conception d'un bâtiment de logements performants. Les données collectées seront alors adaptées aux différents éléments de l'enveloppe (fenêtres, liaisons mur-plancher, traversées de parois, etc.).

CHAPITRE V

APPLICATIONS

Dans ce chapitre, les fonctionnalités de l'outil développé sont présentées à travers deux études de cas. Dans la première, on étudie le renouvellement d'air par infiltration et son incidence sur les objectifs de performances énergétiques dans le cadre de la conception d'un projet performant. On évalue ensuite l'incidence d'une surventilation nocturne sur les besoins de climatisation des bureaux du bâtiment et sur le confort d'été des logements.

Dans une deuxième partie, on évalue, pour un même projet, l'influence de la perméabilité à l'air de l'enveloppe sur les besoins de chauffage pour différents systèmes de ventilation. L'utilisation des résultats comme données d'entrées par un outil d'ACV permet ensuite de compléter une démarche d'éco-conception.

V-1) EFFIBAT

V-1-1) PRÉSENTATION DU PROJET

V-1-1-1) PARTI ARCHITECTURAL

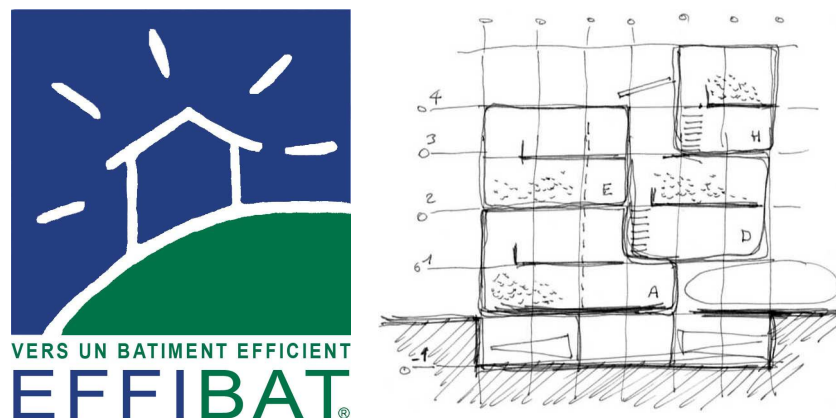


Figure 52 Logo et première esquisse du projet EFFIBAT

Le projet étudié ici a été développé dans le cadre de l'appel à idée CQHE, lancé par le PREBAT et le PUCA. Il est le fruit de la collaboration entre Vinci Construction France, Armines et le cabinet d'architecte Claude Franck. Il s'agit d'un bâtiment urbain s'inscrivant dans une logique de mixité fonctionnelle, il présente donc un étage de commerces, un de bureaux et quatre de logements.

Le parti architectural est de proposer un bâtiment épais, compact donc moins déperditif, mais en évitant de ne proposer que des logements mono-orientés. Pour cela, on place des jardins d'hiver avec éclairage zénithal comme centralité des espaces collectifs familiaux.

L'enveloppe est désolidarisée de la structure afin de limiter les ponts thermiques. Pour inscrire le bâtiment dans une logique d'éco-conception, sa structure est à points porteurs. Cette technique permet de réduire la quantité de matériaux lors de la phase de construction.

V-1-1-2) OBJECTIF DE PERFORMANCE ENERGETIQUE

L'objectif de performance énergétique retenu est le seuil d'exigence réglementaire proposé par le comité opérationnel "bâtiments neufs" du Grenelle de l'environnement, c'est-à-dire une consommation annuelle d'énergie primaire de 50 kWh.m^{-2} .

Cette consommation inclut le chauffage, la climatisation éventuelle, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage, la ventilation et les auxiliaires. Il est très difficile d'évaluer cette consommation en toute généralité dans des commerces, où l'ouverture vers l'extérieur rend inopérante une ventilation double flux, les échanges d'air incontrôlés étant très importants, et où les consommations d'éclairage sont liées au type de commerce (vitrines...). Il est donc décidé de ne considérer un objectif de performance que pour les étages de bureaux et de logements, avec le même niveau de 50 kWh.m^{-2} .

Afin de caler les objectifs de performance sur les besoins de chauffage, et éventuellement de climatisation du bâtiment, des hypothèses sont nécessaires sur les autres postes de consommation.

Eclairage

Un éclairage à basse consommation dans des bureaux correspond à environ 10 W.m^{-2} . En supposant que l'éclairage artificiel soit utilisé la moitié du temps (230 jours x 4h), on obtient une consommation de l'ordre de 10 kWh.m^{-2} d'électricité, soit de l'ordre de 26 kWh.m^{-2} d'énergie primaire.

Des campagnes de mesure sur des logements [SIDLER, 1997] ont montré que la consommation moyenne d'un logement se situe autour de 500 kWh, et que le gisement d'économie se situe autour de 340 kWh. En considérant 200 kWh pour 70 m², on obtient de l'ordre de 3 kWh.m^{-2} soit de l'ordre de 8 kWh.m^{-2} en énergie primaire.

Eau chaude sanitaire

En considérant qu'une personne consomme 40 litres d'eau chaude à 50 °C (l'eau froide étant à 10 °C en moyenne), et avec un ratio de 4 personnes pour 70 m² et 300 jours par an, la consommation dans un logement est de 2230 kWh.

Des équipements sanitaires à faible débit permettent de réduire la consommation d'eau chaude de 30%, et un système solaire thermique fournit 50% de l'énergie nécessaire. La consommation est alors de 780 kWh, soit 11 kWh.m^{-2} .

La consommation d'eau chaude sanitaire est faible dans les bureaux, une valeur de 2 kWh.m^{-2} peut être considérée.

Ventilation

En considérant un renouvellement d'air hygiénique de $25 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ par personne et une surface de 10 m² par personne, on obtient de l'ordre d'un volume par heure à renouveler dans les bureaux durant les périodes d'occupation (230 jours x 10h), donc $2,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ par m² si la hauteur sous plafond est de 2,5 m.

Dans les logements, le débit d'air réglementaire dépend du nombre de pièces, et correspond à environ 0,5 volume par heure. Le renouvellement d'air mécanique est alors de $1,25 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ par m² si la hauteur sous plafond est de 2,5 m.

En considérant une ventilation double flux (donc deux ventilateurs) et des ventilateurs assez performants, consommant 0,1 W pour un débit d' $1 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, la consommation d'énergie vaut 3 kWh.m^{-2} dans les bureaux et 6 kWh.m^{-2} dans les logements.

Auxiliaires

Une pompe est nécessaire pour distribuer la chaleur produite par une pompe à chaleur ou une sous-station de chauffage urbain afin d'alimenter les batteries chaudes d'un chauffage à air. Cette consommation d'énergie primaire est supposée de l'ordre de 4 kWh.m^{-2} .

Le seuil de consommation annuelle d'énergie primaire pour le chauffage et le rafraîchissement est alors de :

$50 - 26 - 2 - 3 - 4 = 15 \text{ kWh.m}^{-2}$ pour les bureaux (par exemple 12 pour le chauffage et 3 pour la climatisation)

$50 - 8 - 11 - 6 - 4 = 21 \text{ kWh.m}^{-2}$ pour les logements (non climatisés).

Objectifs de consommation annuelle d'énergie primaire pour le chauffage et rafraîchissement	
Logements	21 kWh.m ²
Bureaux	15 kWh.m ²

Tableau 38 Objectifs de consommation annuelle pour le projet

V-1-2) HYPOTHÈSES THERMIQUES

V-1-2-1) GÉOMÉTRIE DU BÂTIMENT

Le bâtiment (R+5) a été modélisé en 10 zones : commerces en rez-de-chaussée (1140 m²), bureaux au premier étage (en distinguant sud, centre et nord, même surface totale que les commerces), logements d'étages courants (1100 m² par niveau) et logements du dernier étage (même découpage que pour les bureaux selon l'orientation) et atrium. La géométrie considérée est saisie en mode plan puis visualisée en 3D (Figure 53 et Figure 54).

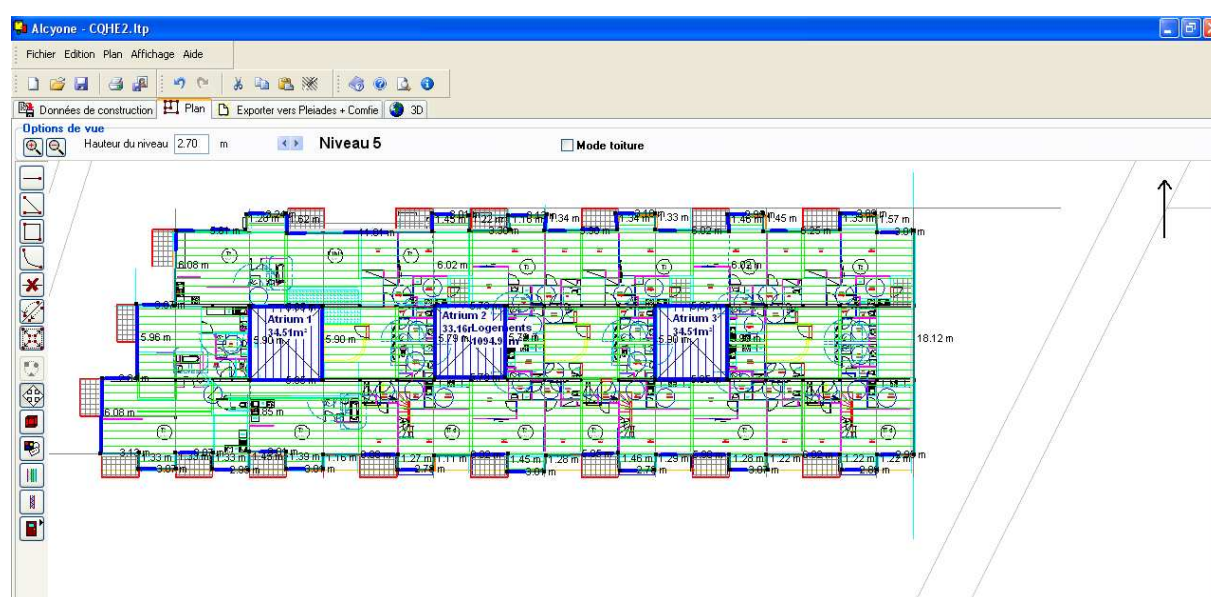


Figure 53 Saisie du projet dans Alcyone

V-1-2-2) COMPOSITION DES PAROIS ET MENUISERIES

Les compositions des parois et des menuiseries considérées lors du calcul sont explicitées dans le Tableau 39.

On considère aussi une valeur de ponts thermique de 160 W.K^{-1} par niveau qui tient compte de la désolidarisation des façades, de l'isolation des murs et refends sur une hauteur d'un mètre en dessous du sol, de l'isolation des acrotères et des fenêtres positionnées dans le plan de l'isolant.

Des modules photovoltaïques seront positionnés en toiture selon la surface disponible en intégration.

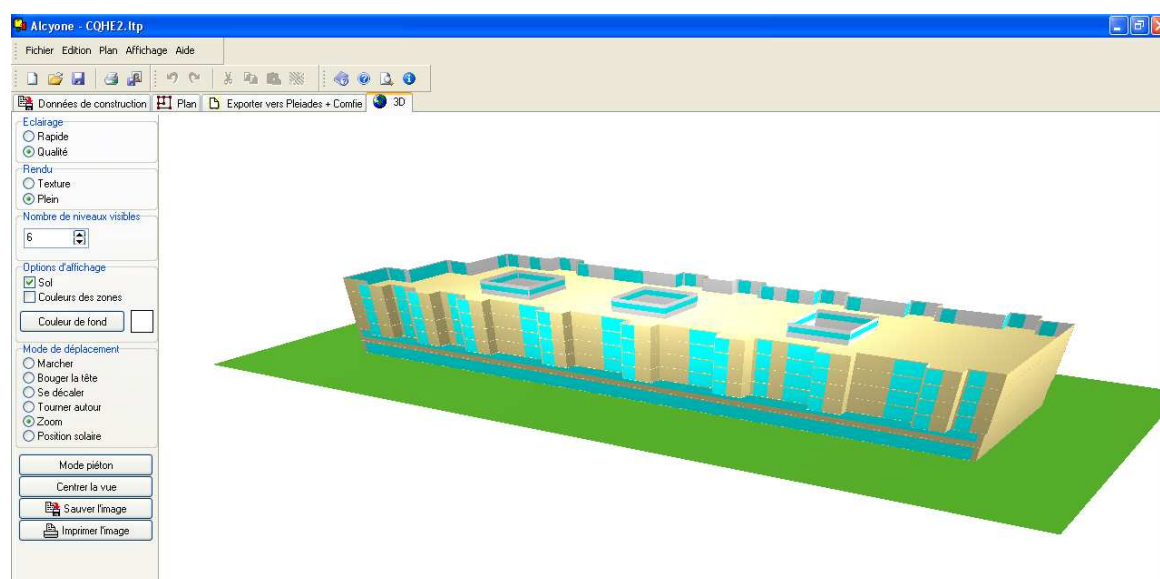


Figure 54 Représentation 3D du projet dans Alcyone

Intitulé	Composition	Coefficient de transmission thermique (U en $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)
<i>Façade</i>	3 cm béton haute performance BEFUP – 16 cm laine de verre – BA 13	0,23
<i>Plancher bas</i>	20 cm béton – 10 cm polystyrène expansé en sous face – BA13	0,34
<i>Toiture terrasse</i>	20 cm béton – 10 cm polyuréthane	0,27
<i>Cloison légère atrium/logement</i>	BA 13 – 10 cm laine de verre – BA 13	0,35
<i>Fenêtre</i>	Double vitrage à lame d'argon – menuiserie PVC	1,2 (U_{baie})

Tableau 39 Caractéristiques thermiques de l'enveloppe

V-1-2-3) FONCTIONNEMENT DU BÂTIMENT

Le renouvellement d'air se fait par une ventilation double flux avec récupérateur de chaleur muni d'un échangeur d'efficacité 80% pour les logements et les bureaux.

Le chauffage est assuré par le circuit de ventilation (la génération se fait par pompe à chaleur ou par chauffage urbain).

En ce qui concerne l'eau chaude sanitaire solaire, 0,5 m² de capteur et 50 litres de stockage sont fixés par personne.

Les scénarii de fonctionnement pour les logements sont les suivants :

- *Chauffage* : 20°C constant ;
- *Ventilation* : 0,5 vol.h⁻¹ par ventilation mécanique ;
- *Apports internes* : 16 W.m⁻² à 7h et de 20h à 23h, 1 W.m⁻² le reste du temps soit 36 kWh.m⁻² sur une année. En considérant 4 personnes dans 70 m², et 80 W émis par une personne, 5 h de présence par jour, les apports internes liés aux occupants représentent environ 8 kWh.m⁻². La consommation d'électricité est de l'ordre de 2000 à 3000 kWh par logement selon le choix des appareils électro-ménagers et le mode de vie, environ 75% de cette consommation contribue au chauffage du logement, donc les apports internes annuels sont de l'ordre de 27 kWh.m⁻² au total.

Les scénarii de fonctionnement pour les bureaux sont les suivants :

- *Chauffage* : 20°C de 8h à 20h en semaine, 15°C le reste du temps ;
- *Climatisation* : 27°C de 8h à 20h en semaine, pas de consigne le reste du temps ;
- *Ventilation* : 1 vol.h⁻¹ de 8h à 20h en semaine, par les infiltrations d'air le reste du temps ;
- *Apports internes* : 12 W.m⁻² dans les bureaux de 8h à 20h en semaine, 1 W.m⁻² le reste du temps.

L'été, on considère une occultation de 50% dans les bureaux grâce à des dispositifs de protections solaires et 80% dans les logements, pour prendre en compte une fermeture des volets pendant la journée.

V-1-2-4) DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

Les données climatiques utilisées correspondent à la station météorologique de Trappes (le graphique ci-dessous montre l'évolution annuelle de la température extérieure), aucun masque n'est considéré.

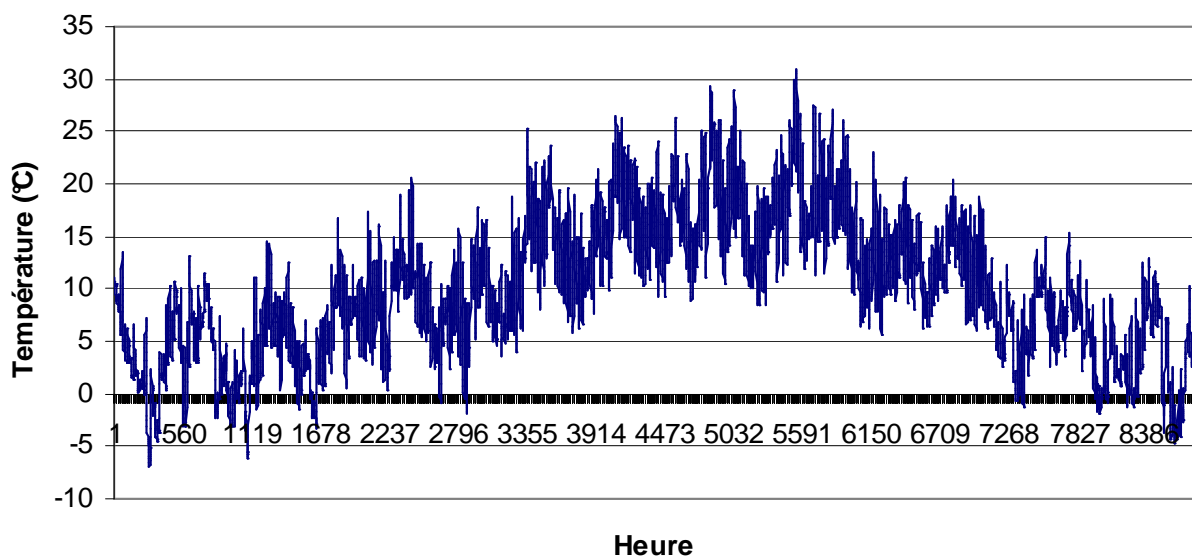


Figure 55 Température extérieure moyenne heure par heure pour une année type à Trappes

V-1-3) HYPOTHÈSES AÉRAULIQUES

V-1-3-1) HIVER

On étudie les neuf zones pour lesquelles sont fixées des objectifs de performance, c'est-à-dire l'ensemble du bâtiment moins les commerces.

Au niveau de l'enveloppe, on prend en compte une connexion par paroi de zone, soit en tout 28 connexions. Etant donnée l'homogénéité de la répartition des vitrages sur les façades, ces 28 connexions présentent des coefficients géométriques C issu de la pondération surfacique de la valeur du I_4 considéré.

Pour chaque paroi de zone en contact avec l'extérieur, le débit à travers les défauts d'étanchéité va s'exprimer selon une loi de puissance dont les caractéristiques sont les suivantes :

$$n = 0,67$$

$$C = \frac{I_4 S}{4^{0,67}}$$

Où S (en m^2) est la surface de la paroi considérée.

Les zones intérieures sont reliées entre elles par des portes. Elles sont également toutes reliées aux atriums. Les parois à l'interface entre les logements ou bureaux et l'atrium sont considérées comme présentant la même étanchéité que les parois extérieures (pour éviter de parasiter le renouvellement d'air par ventilation double flux). Au total le projet présente 38 connexions aérauliques.

Variantes étudiées

Niveau d'étanchéité I_4 considéré (en $m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ sous 4 Pa)
0,6
1
1,7

Tableau 40 Hypothèses sur l'étanchéité à l'air pour les trois variantes

Trois variantes sont étudiées, il s'agit de faire varier le niveau d'étanchéité à l'air du bâtiment pour évaluer son influence sur les besoins de chauffage du bâtiment. L'objectif est le niveau BBC. Dans le cadre de ce label, il est imposé d'atteindre un niveau d'étanchéité à l'air de $1 m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ d'enveloppe.

Ici, on fait varier le niveau d'étanchéité à l'air autour de cette valeur ($0,6 m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ correspondant à la valeur cible pour les maisons individuelles et $1,7 m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ la valeur par défaut de la réglementation thermique supposée représentative d'un projet où aucune attention particulière n'est portée à l'étanchéité).

V-1-3-2) ETÉ

L'été, le bâtiment présente les mêmes connexions auxquelles sont ajoutées des entrées d'air pour les bureaux et des fenêtres ouvertes pour les logements qui permettent de surventiler le bâtiment pendant la nuit (de 20h à 8h). La Figure 56 montre une vue en coupe du bâtiment.

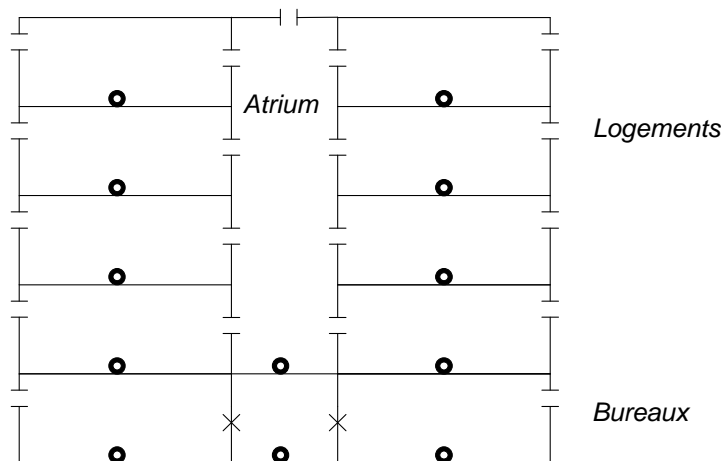


Figure 56 Vue en coupe du bâtiment et des différentes connexions aérauliques

Diminution des besoins de climatisation des bureaux par free-cooling

Les bureaux ne communiquant pas avec les atria pour des raisons de sécurité incendie, on considère que le renouvellement d'air se fait par des entrées d'air. Pour l'étude des bureaux, on fait varier le ratio surface d'ouvertures/surface au sol de 0 à 8%, différentes études montrent qu'un ratio entre 2 et 6% permet de tirer fortement partie de la surventilation nocturne. Ces entrées d'air sont modélisées par une loi d'orifice (équation (54), avec un coefficient de décharge de 0,65) variant selon les surfaces présentées dans le Tableau 41. On va étudier ici les besoins de climatisation pour une année normale puis pour l'année de la canicule à Trappes (en 2003, cf. Figure 57). Les surfaces d'ouvertures sont réparties au prorata sur chaque paroi extérieure.

Pourcentage de surface au sol	0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
Surface d'ouverture (m ²)	0	10,38	20,76	31,14	41,52	51,9	62,28	72,66	83,04

Tableau 41 Hypothèse d'ouverture des entrées d'air dans les bureaux

Etude du confort thermique dans les logements

En ce qui concerne les logements, on fait varier la surface de fenêtre ouverte. Le Tableau 42 montre la correspondance entre le pourcentage et la surface considérée (le projet présente 186 m² de fenêtres par niveau de logement). La surface d'ouverture dans les atria est également prise au prorata. Une fenêtre ouverte est modélisée comme une grande ouverture, on fixe ici le coefficient de décharge à 0,78. On effectue cette étude pour le cas le plus défavorable, c'est-à-dire avec le fichier météo de 2003.

Niveau d'ouverture des fenêtres	0%	10%	20%	30%	40%
Surface par niveau de logement (m ²)	0	18,60	37,20	55,80	74,40
Surface par niveau dans les atria (m ²)	0	6,84	13,68	20,52	27,36

Tableau 42 Hypothèse d'ouverture de la surface d'ouvrants disponible dans les logements

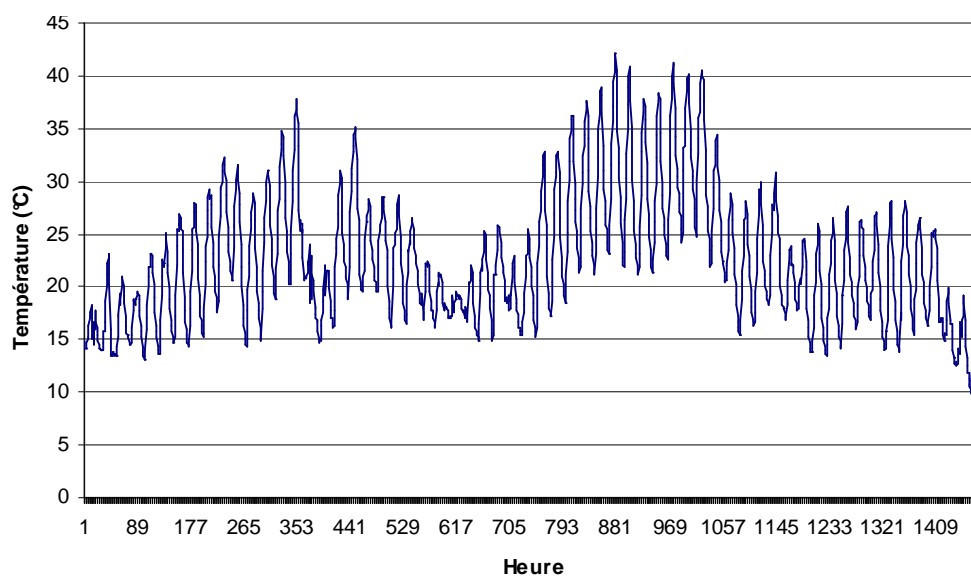


Figure 57 Evolution de la température extérieure en juillet et août 2003

V-1-3-3) VITESSE DE VENT AU SITE

Pour mener à bien l'étude, on dispose heure par heure de la vitesse moyenne et de la direction du vent à la station météorologique de Trappes (voir Figure 58 et Figure 59)

Le bâtiment étudié ici n'entre pas dans la catégorie des configurations types des tables de l'AIVC. Les coefficients de pression ont alors été calculés par l'outil Cp Generator⁷. Cet outil permet de calculer les coefficients de pression de bâtiments présentant des géométries particulières. Il a été développé à partir de tests en soufflerie et ses résultats ont été validés par [KNOLL & AL, 1997] et [HEIJMANS & WOUTERS, 2002].

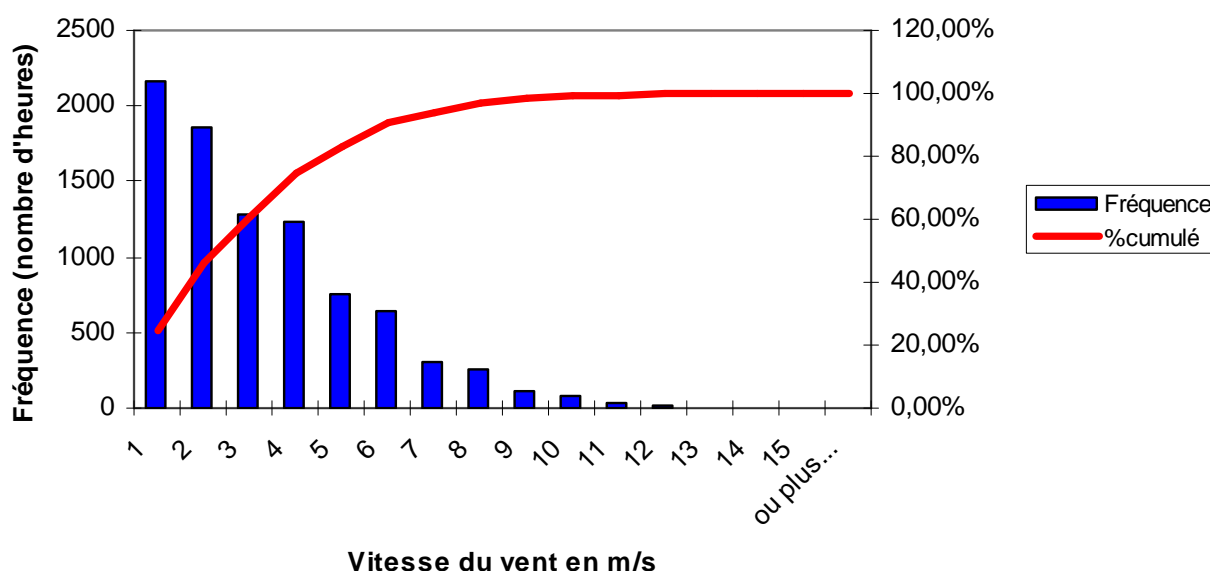


Figure 58 Fréquence et fréquence cumulée des vitesses de vent sur une année type à Trappes

⁷ Utilisable en ligne sur <http://cpgen.bouw.tno.nl/cp/>

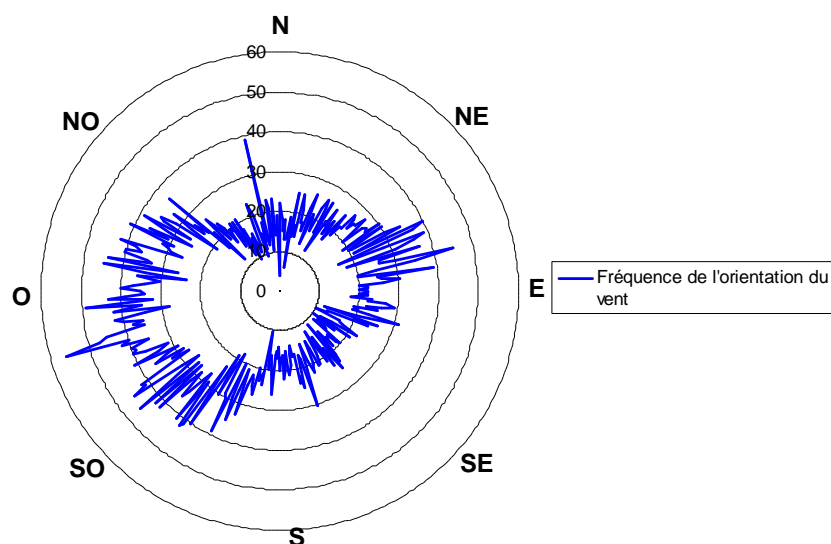


Figure 59 Fréquence de l'orientation du vent à Trappes

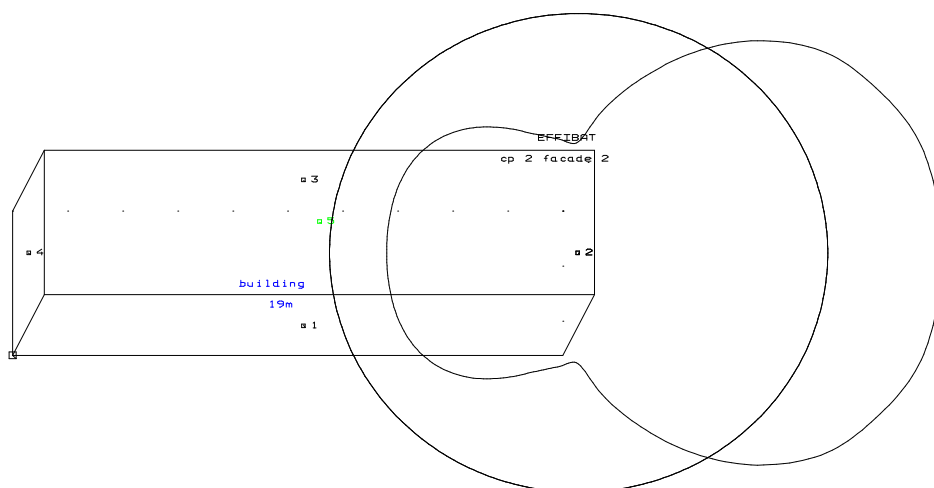


Figure 60 Représentation du bâtiment dans Cp Generator

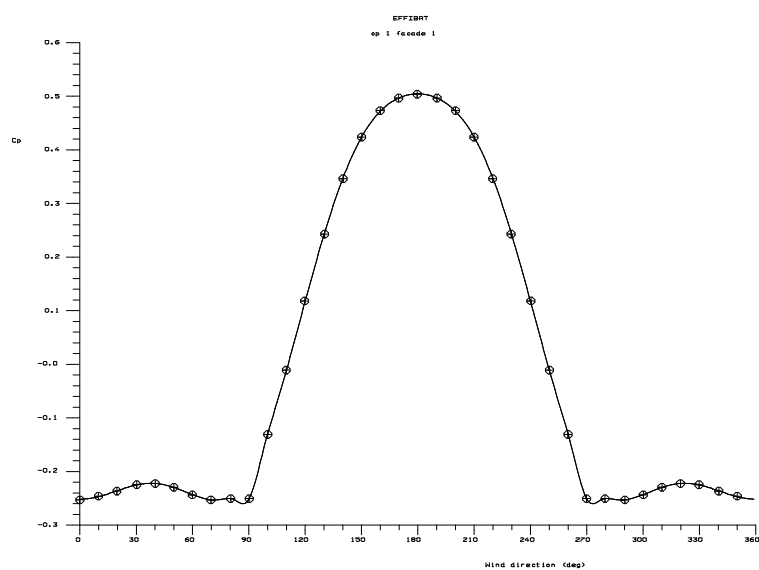


Figure 61 Evolution du coefficient de pression en fonction de l'orientation du vent pour la façade 1

La vitesse du vent de la station météorologique est ramenée à une vitesse de vent au bâtiment en utilisant l'équation (34) présentée dans le chapitre II et en considérant le cas d'un espace urbain ou périurbain. Au niveau du bâtiment la vitesse du vent s'exprimera donc par :

$$v = v_{met} \left(\frac{270}{10} \right)^{0,14} \left(\frac{16,2}{370} \right)^{0,22} = 0,797 v_{met}$$

V-1-3-4) REMARQUE SUR L'EVALUATION DES CONDITIONS AU SITE

L'évaluation des coefficients de pression et de la vitesse du vent au site est basée sur des hypothèses générales d'environnement du bâtiment. Plusieurs études comme celle de [GEROS & AL., 1999], montrent que le potentiel de rafraîchissement nocturne pour un bâtiment peut être considérablement amoindri en raison de la très forte baisse de la vitesse du vent dans les canyons urbains.

Ce potentiel peut également être amoindri par l'effet des îlots de chaleur urbains, ces derniers provoquant une augmentation de la température extérieure, le renouvellement d'air dû aux différences de température peut en être amoindri.

V-1-4) RÉSULTATS

V-1-4-1) BESOINS DE CHAUFFAGE

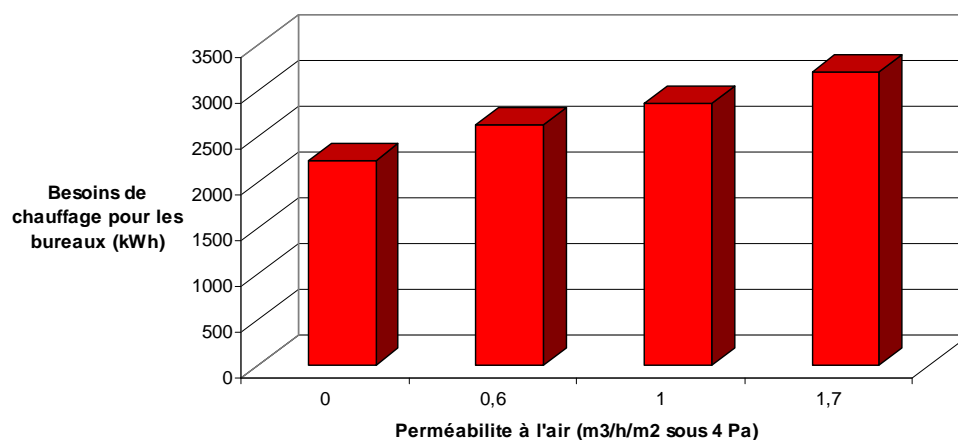


Figure 62 Besoins de chauffage pour les bureaux

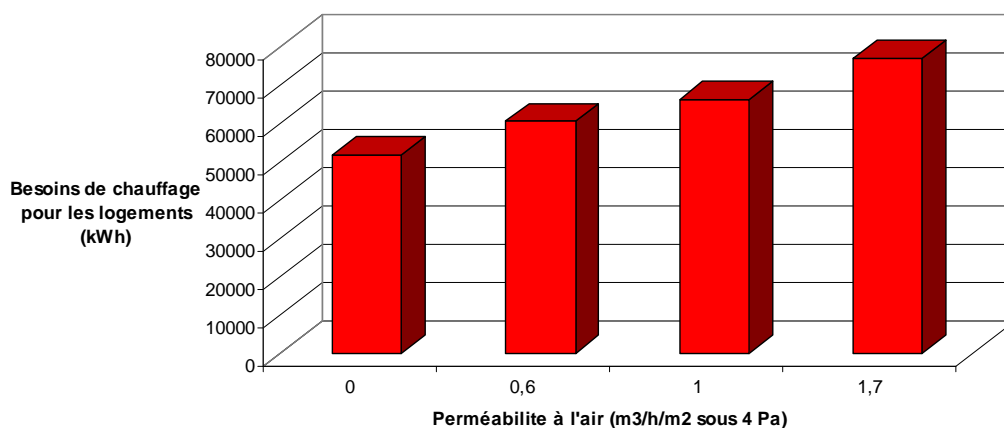


Figure 63 Besoins de chauffage pour les bureaux

I_4 (en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ sous 4 Pa)	Besoin de chauffage pour les bureaux ($\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$)	Besoin de chauffage pour les logements ($\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$)
0	2,8	11,8
0,6	3,2	13,8
1	3,4	15,1
1,7	3,8	17,5

Tableau 43 Résultat des deux simulations

Les besoins de chauffage évalués par la simulation pour les différentes variantes sont représentés sur les figures de la page 117 et résumés dans le Tableau 43. On constate un écart important entre elles. Pour les logements, à caractéristiques thermiques identiques, la valeur de la perméabilité à l'air du bâtiment devient un élément clé de la performance thermique.

Renouvellement d'air par infiltration

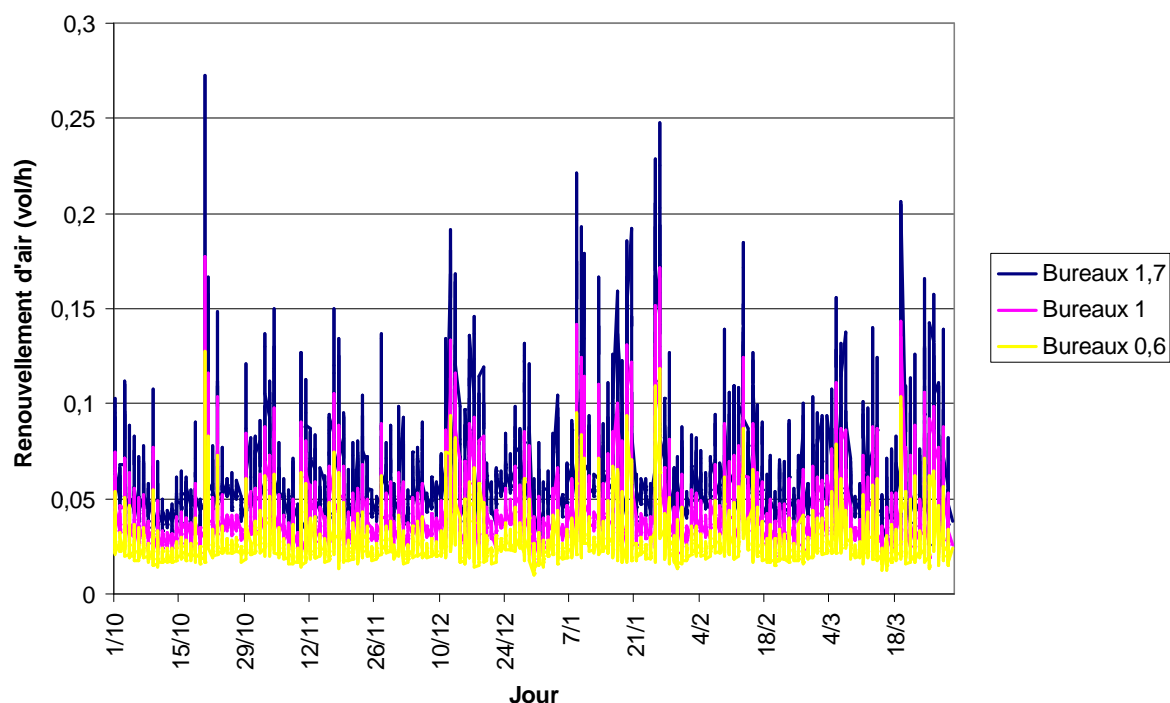


Figure 64 Renouvellement d'air par infiltration pour les bureaux en fonction du niveau de perméabilité à l'air d'octobre à mars

A chaque pas de temps, on obtient les débits transitant par les différentes connexions aérauliques. Il est alors intéressant d'en déduire le renouvellement d'air parasite issu des infiltrations d'air pour ce projet. Les figures 64 et 65 montrent le renouvellement d'air par infiltration d'octobre à février pour les bureaux et les logements. On y voit que le débit parasite est très variable, en raison de sa dépendance aux phénomènes météorologiques. Plus le bâtiment est perméable, plus il devient sensible à ces variations. En ce qui concerne les bureaux, le débit parasite peut atteindre $0,25 \text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$. Dans les logements, on observe des cas supérieurs à $0,5 \text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$ dans l'hypothèse la plus perméable.

Le Tableau 44 montre le renouvellement d'air moyen sur cette période. Celui-ci peut atteindre $0,1 \text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$ pour les logements dans le cas le plus perméable.

	Bureaux	Logements
Cas $I_4 = 1,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	0,06	0,10
Cas $I_4 = 1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	0,04	0,06
Cas $I_4 = 0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	0,03	0,04

Tableau 44 Renouvellement moyen dû aux infiltrations d'air d'octobre à mars en vol/h

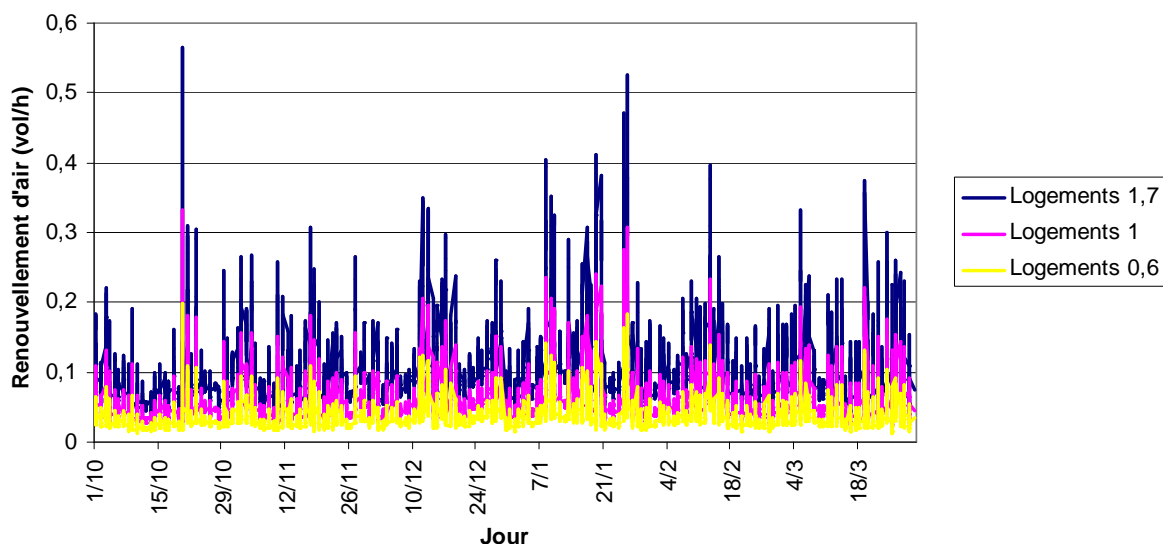


Figure 65 Renouvellement d'air par infiltration pour les logements en fonction du niveau de perméabilité à l'air d'octobre à mars

Efficacité effective de l'échangeur de chaleur

En reprenant les débits parasites heure par heure et l'équation (126) du chapitre III, on peut obtenir une estimation de l'efficacité effective de la récupération de chaleur dans le processus de renouvellement de l'air du bâtiment. La Figure 66 montre cette évolution tout au long de la période d'octobre à mars.

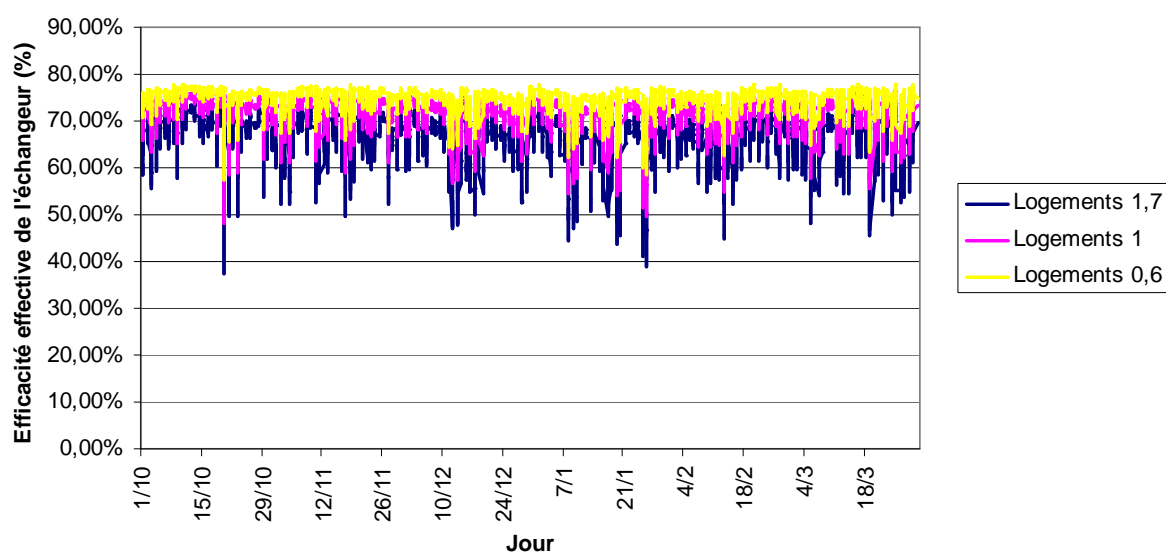


Figure 66 Efficacité effective de l'échangeur de chaleur de la ventilation double flux pour les logements en fonction du niveau de perméabilité à l'air d'octobre à mars

On voit sur cette courbe que l'amélioration de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe permet de contenir la dégradation des performances du système. Dans les cas 0,6, 1 et 1,7 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, la moyenne de l'efficacité effective de l'échangeur sera respectivement de 75%, 71% et 67%.

Température dans les atria en janvier et février

La Figure 67 montre l'évolution de la température dans l'atrium pour les mois de janvier et février. Cette température ne passe pas en dessous de 19°C (la semaine du 8 au 15 janvier est la plus froide de l'année dans le fichier météo). Pendant cette période, la différence de température entre les trois variantes n'atteint pas plus que 0,2°C.

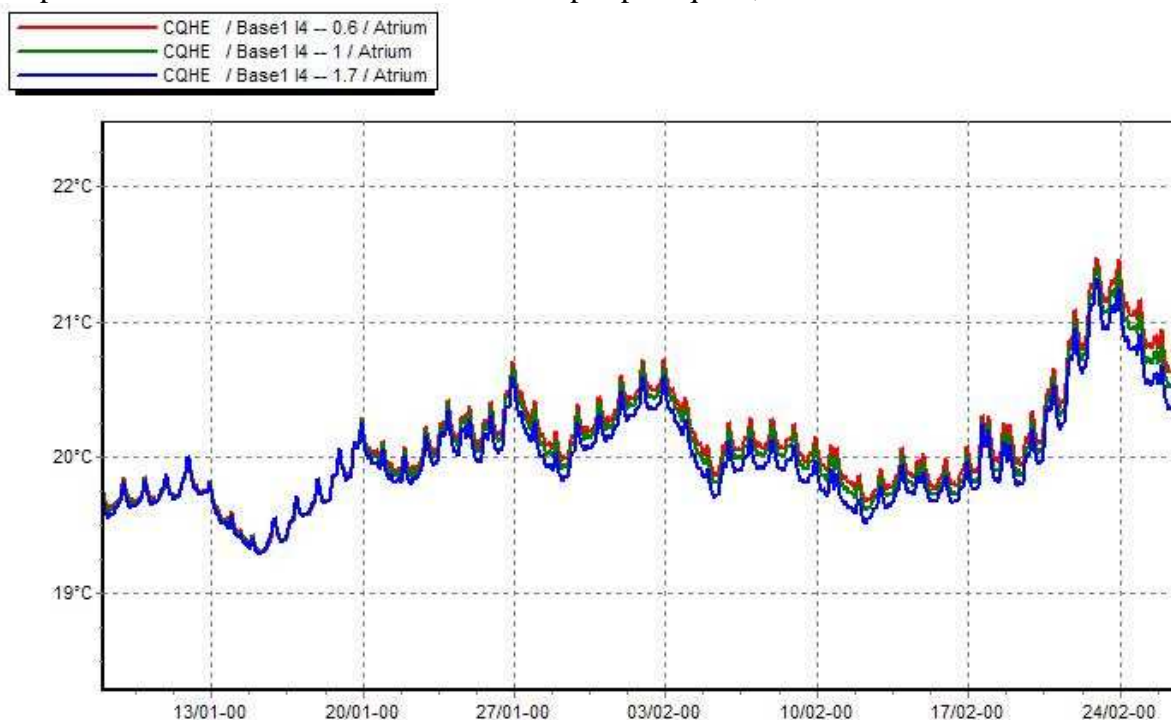


Figure 67 Evolution de la température dans les atria en janvier et février pour les trois variantes

V-1-4-2) CONFORT D'ETE

Besoins de climatisation et température dans les bureaux

Les figures ci-dessous montrent les besoins de climatisation pour une année type puis pour une année extrême. Dans le premier cas, en augmentant la surface d'ouverture la nuit, on arrive à réduire considérablement les besoins de climatisation : 3 $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$, 2 $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$, et 1,5 $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ pour les cas 3%, 4% et 5%. Ces valeurs correspondent respectivement à environ 30, 40 et 50 m^2 d'ouverture, on peut les atteindre avec des systèmes de grilles placées sur les fenêtres et ouvertes en été.

L'année de la canicule, le rafraîchissement nocturne permet aussi de réduire considérablement les besoins de climatisation même si, pour les cas évoqués précédemment, les besoins de climatisation par m^2 sont environ 8 kWh plus élevés. En se basant sur ce climat et une étanchéité de 1 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, il est nécessaire de proposer les 3% d'ouverture sur le niveau des bureaux pour atteindre les 15 $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ (dans ce cas, il faudra une installation de chauffage et climatisation avec un coefficient de performance supérieur à 2,58).

Dans le cas d'une année type, cette valeur tombe en dessous de 1%. En choisissant 3% d'ouverture on diminue alors drastiquement les besoins de climatisation et on arrive à des besoins annuels totaux (chauffage et climatisation) de 6,5 kWh.m².

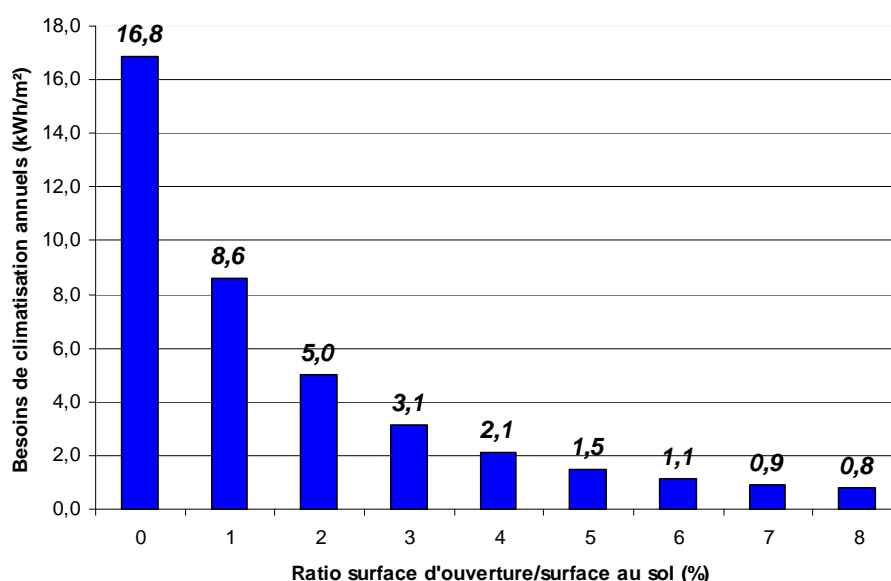


Figure 68 Besoins de climatisation annuels par m² de bureau pour différentes surface d'ouverture (année moyenne)

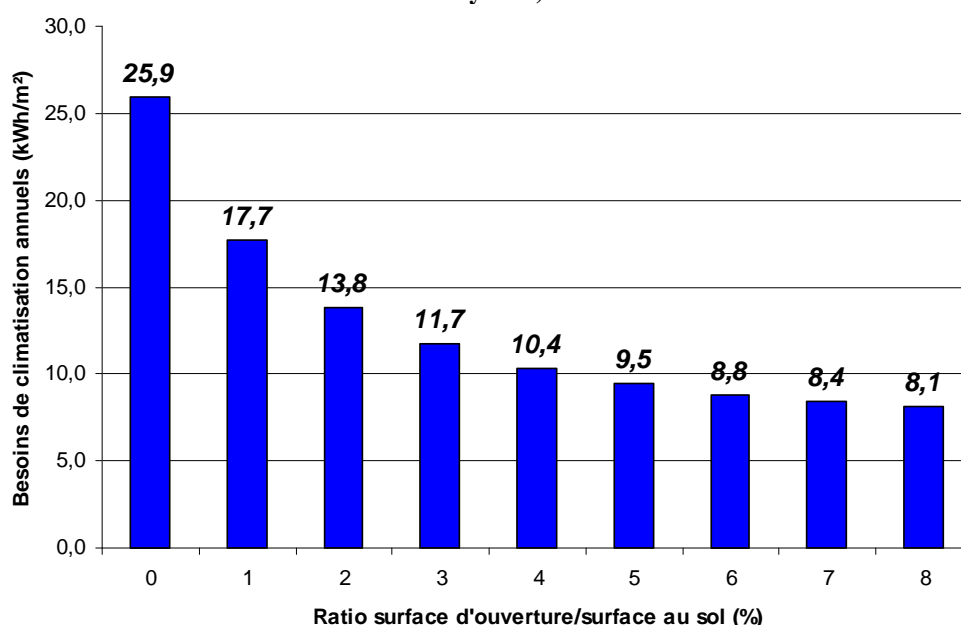


Figure 69 Besoins de climatisation annuels par m² de bureau pour différentes surface d'ouverture (année caniculaire)

Les figures de la page 122 montrent l'évolution de la température dans les bureaux pendant la semaine la plus chaude de l'année type et de l'année 2003. Pendant l'année type, on observe une nette chute des températures pendant la nuit. Plus la surface d'ouverture est grande et plus cette chute est prononcée, on observe par exemple un écart de 8°C entre la variante 1% et la variante 8% dans la nuit du 13/08 par exemple. Les pics de température sur les différents graphes sont dues aux scénarii d'apports internes.

Pendant la canicule, le bâtiment se réchauffe pendant la nuit. Dans les cas les plus favorables, on assiste à un rafraîchissement, mais jamais au dessous de 25°C.

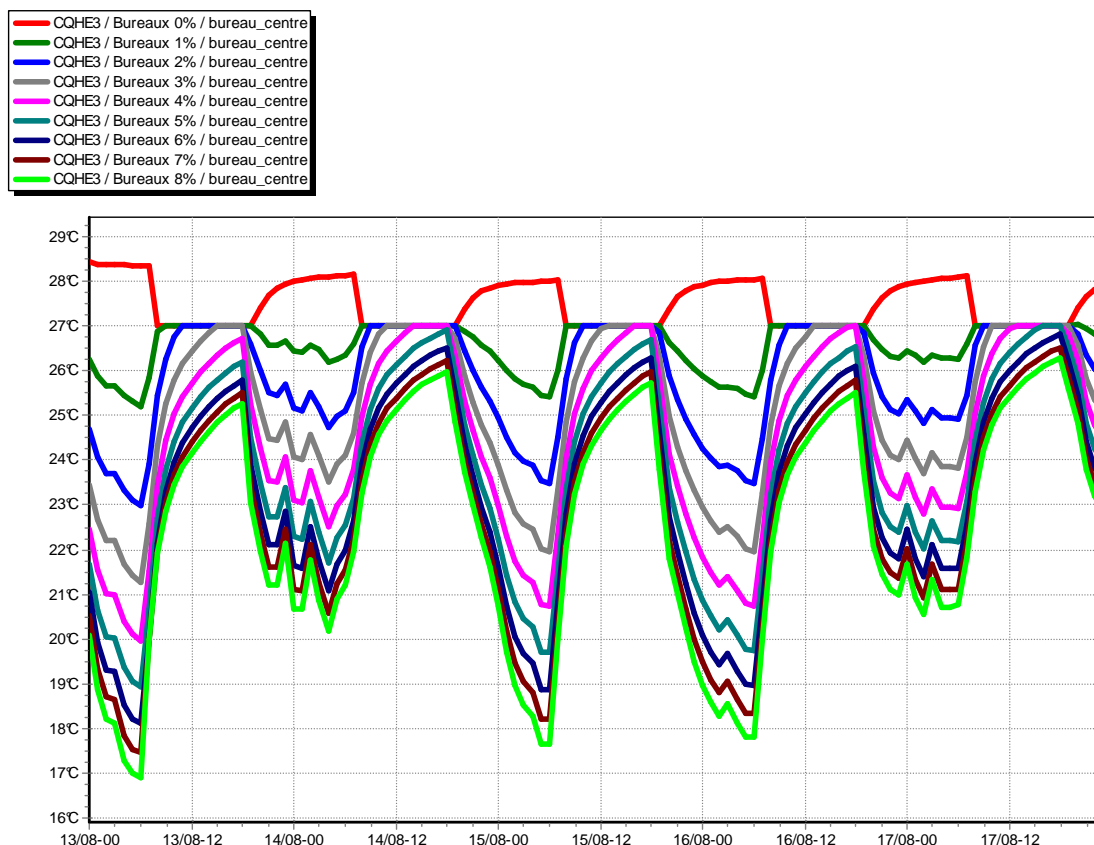


Figure 70 Température dans les bureaux dans le corps du bâtiment pour différents scénarii d'ouverture pendant la semaine la plus chaude d'une année type

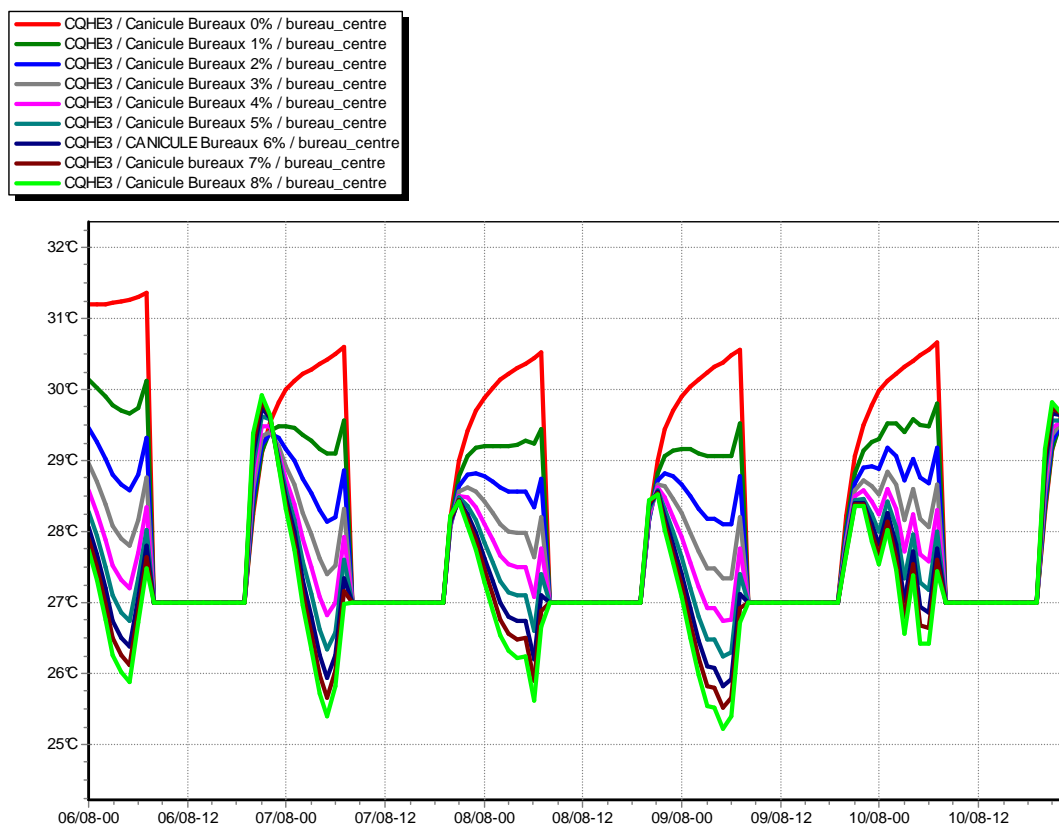


Figure 71 Température dans les bureaux dans le corps du bâtiment pour différents scénarii d'ouverture pendant la semaine la plus chaude de l'année 2003

Température dans les logements pendant la canicule

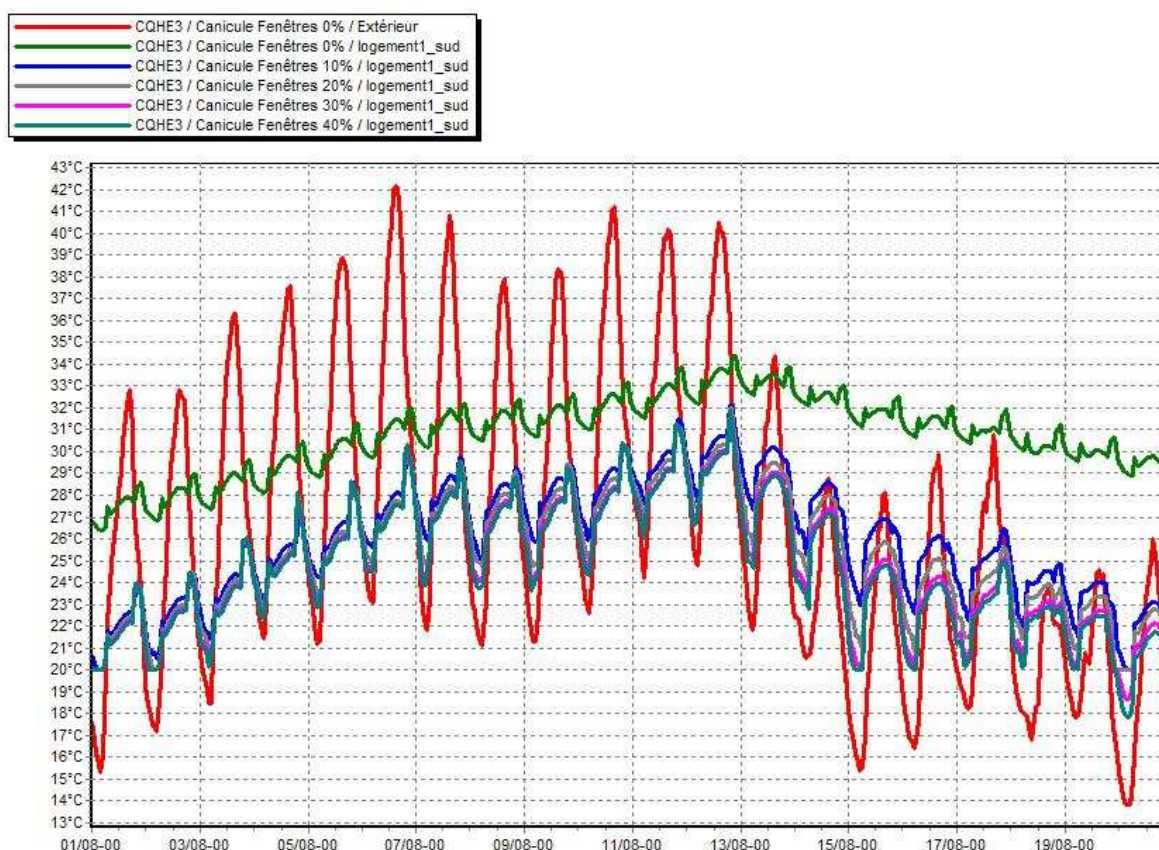


Figure 72 Température dans les logements au Sud sur la période du 01/08 au 20/08/2003 pour différents niveaux d'ouverture des fenêtres

Sur la Figure 72, on peut voir l'évolution de la température dans les logements (non climatisés) dans la partie Sud du bâtiment pour les différents scénarii d'ouverture des fenêtres. Sur cette période, on observe dans les logements un renouvellement d'air moyen de 5 vol.h^{-1} pour la variante 10% et respectivement 8 vol.h^{-1} , 12 vol.h^{-1} et 15 vol.h^{-1} pour les variantes 20%, 30% et 40% de fenêtres ouvertes. L'atrium permet en effet de bénéficier d'une ventilation traversante. La Figure 73 ci-dessous montre l'évolution du renouvellement d'air pour les logements sur cette même période.

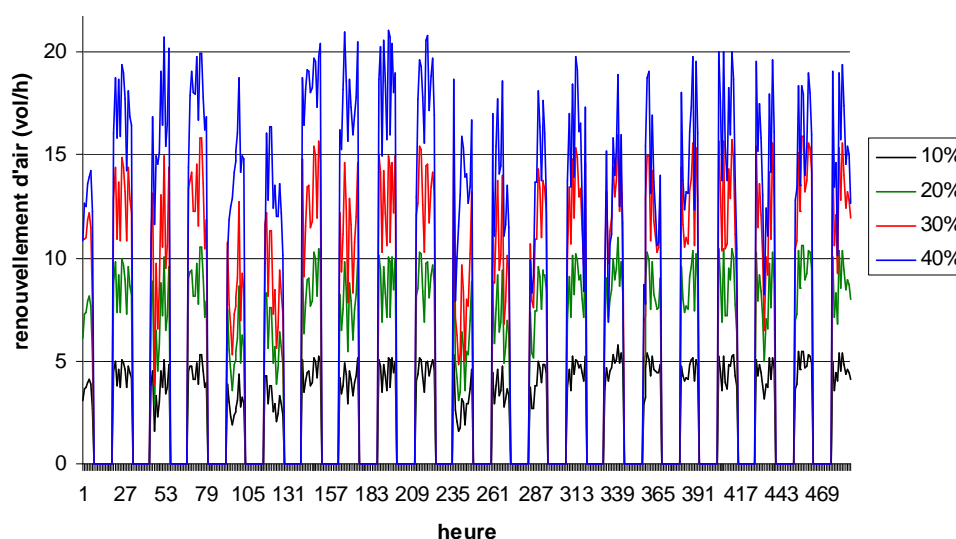


Figure 73 Renouvellement d'air dans les logements selon le scénario d'ouverture du 01/08 au 20/08/2003

Température dans l'atrium pendant la canicule

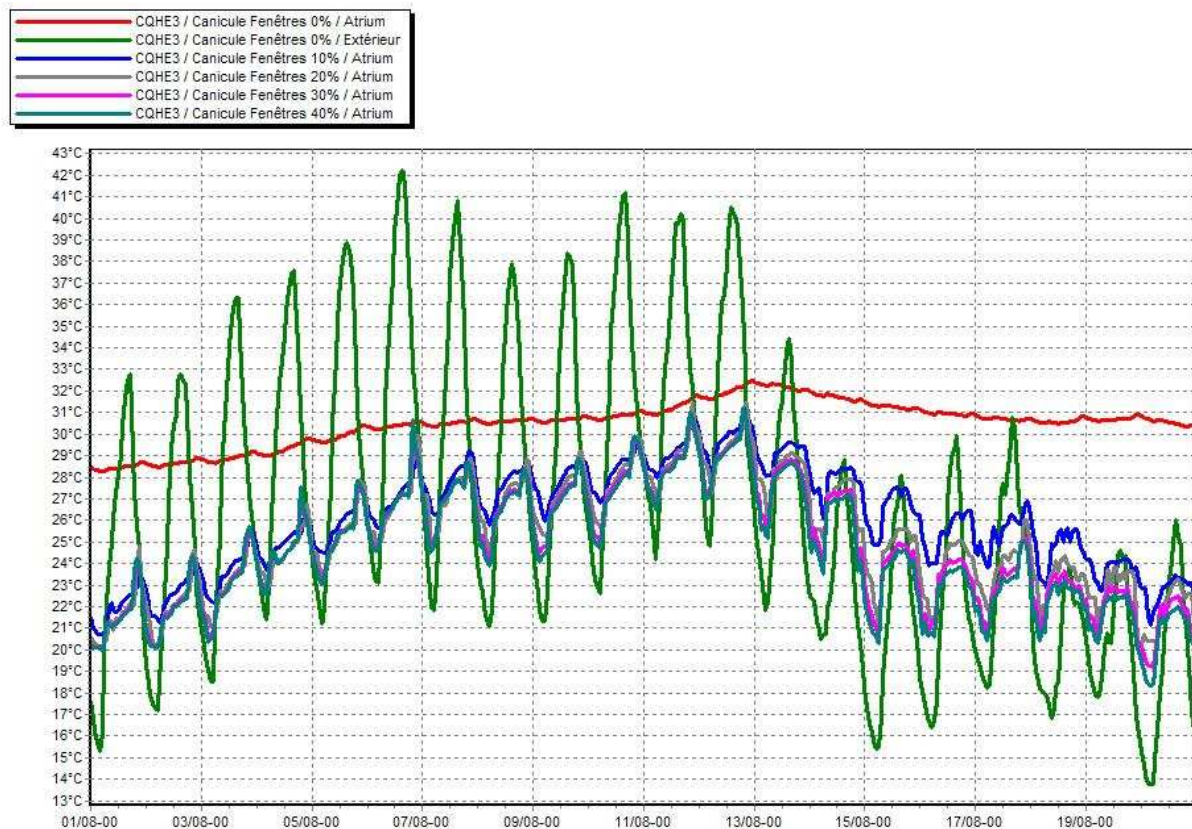


Figure 74 Température dans les atria sur la période du 01/08 au 20/08/2003 pour différents niveaux d'ouverture des fenêtres

De la même manière que pour les logements, pendant les vingt premiers jours du mois d'août, la surventilation nocturne permet de garder une température très en dessous de la température extérieure dans l'atrium.

V-1-5) CONCLUSION

Au niveau du projet EFFIBAT, ces simulations montrent que les objectifs de performance tant pour le chauffage que pour la climatisation sont atteignables avec la variante proposée du bâtiment.

L'été, les simulations montrent un niveau de confort acceptable dans les logements. Cette variante devra toutefois permettre un rafraîchissement nocturne des bureaux avec un ratio surface d'ouverture/surface au sol d'au moins 3% pour tenir les objectifs de besoins de climatisation lors des années caniculaires.

V-2) ETUDE ÉNERGÉTIQUE ET ENVIRONNEMENTALE D'UN PROJET DE LOGEMENTS EN BELGIQUE

V-2-1) PRÉSENTATION DU PROJET

Le bâtiment étudié est un projet de logements réalisé par la filiale Belge de Vinci Construction. Il est situé dans la ville d'Uccle dans la banlieue de Bruxelles. Le bâtiment a pour particularité de présenter une enveloppe très isolée (isolation par l'extérieur polyuréthane et brique, double vitrage peu émissif) et une ventilation double flux.

Il a servi de cas d'étude dans le cadre de la démarche d'éco-conception de Vinci.

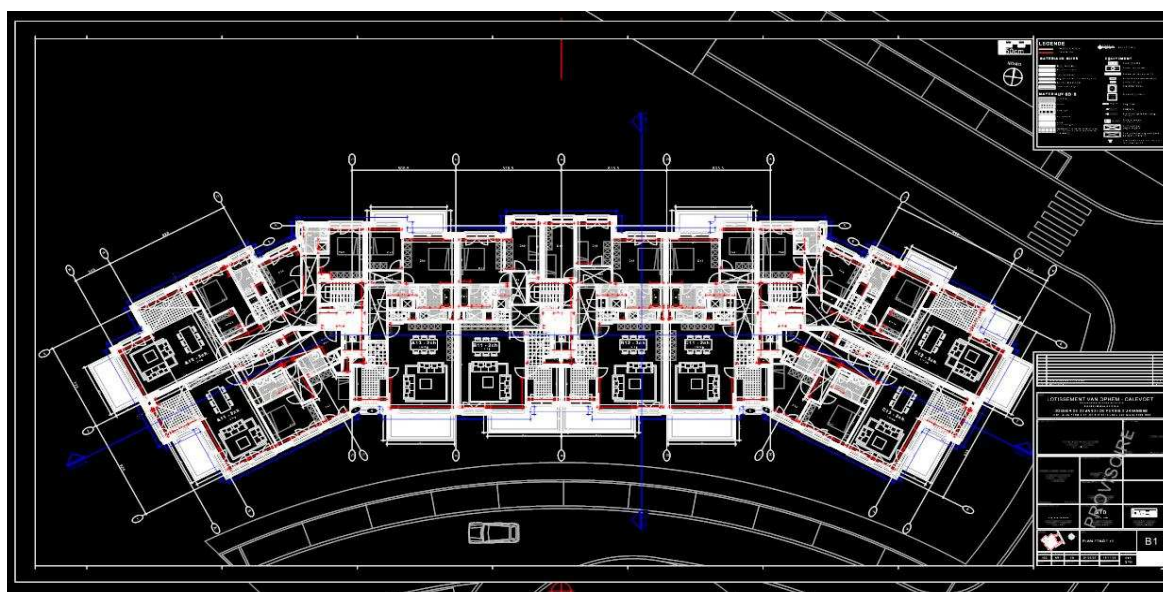


Figure 75 Plan d'un étage courant du bâtiment

V-2-2) ETUDE THERMIQUE

V-2-2-1) GÉOMÉTRIE DU BÂTIMENT

Le bâtiment étudié présente environ 1000 m² par étage courant. On prend en compte une zone par étage.



Figure 76 Représentation 3D du bâtiment dans Alcyone

V-2-2-2) COMPOSITION DES PAROIS ET MENUISERIES

Les tableaux ci-dessous présentent respectivement les compositions des parois et menuiseries et la valeur des ponts thermiques considérés pour chaque niveau.

Intitulé	Composition	Coefficient de transmission thermique (U en $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)
<i>Façade</i>	10 cm brique – 6 cm polyuréthane – 18 cm béton	0,42
<i>Plancher bas</i>	18 cm béton – 9 cm béton mousse – 8 cm polyuréthane TMS	0,32
<i>Toiture terrasse</i>	6 cm polyuréthane TMS – 9 cm béton mousse – 18 cm béton	0,32
<i>Fenêtre</i>	Double vitrage à lame d'argon – menuiserie PVC	1,2 (U_{baie})

Tableau 45 Caractéristiques thermiques de l'enveloppe

Liaison	Pont thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
<i>Plancher haut</i>	0,75
<i>Plancher bas</i>	0,55
<i>Mur-Mur</i>	0,17
<i>Mur-Refend-Mur</i>	0,04
<i>Planchers intermédiaires (liaison courante)</i>	0,06
<i>Planchers intermédiaires (balcons)</i>	0,26
<i>Appui de fenêtre et linteau</i>	0,1

Tableau 46 Valeur des ponts thermiques**V-2-2-3) FONCTIONNEMENT DU BÂTIMENT**

Les scénarii de fonctionnement (consigne de chauffage et puissance dissipée) sont basés sur les mêmes hypothèses que pour l'étude de cas précédente (voir partie V-1-2-3).

V-2-2-4) DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

On dispose des données météorologiques du site d'Uccle (cf. figures page 128 illustrant vitesse et direction du vent).

Le bâtiment est situé dans une zone suburbaine. Le Tableau 47 montre les coefficients de pression pour les quatre façades du 3^{ème} niveau ($h=6,25\text{m}$) calculés par Cp Generator.

	1	2	3	4
0	0.368	-0.417	-0.184	-0.417
5	0.367	-0.419	-0.183	-0.371
10	0.363	-0.402	-0.181	-0.306
15	0.356	-0.386	-0.177	-0.243
20	0.345	-0.365	-0.172	-0.176
25	0.330	-0.337	-0.168	-0.104
30	0.310	-0.305	-0.165	-0.031
35	0.285	-0.274	-0.163	0.040
40	0.254	-0.244	-0.163	0.106
45	0.218	-0.218	-0.165	0.165
50	0.178	-0.197	-0.169	0.213
55	0.133	-0.183	-0.174	0.247
60	0.087	-0.173	-0.179	0.270
65	0.039	-0.168	-0.184	0.280
70	-0.008	-0.166	-0.187	0.290
75	-0.052	-0.167	-0.186	0.315
80	-0.096	-0.168	-0.185	0.337
85	-0.146	-0.169	-0.191	0.341
90	-0.186	-0.169	-0.186	0.339
95	-0.191	-0.169	-0.146	0.341
100	-0.185	-0.168	-0.096	0.337
105	-0.186	-0.167	-0.052	0.315
110	-0.187	-0.166	-0.008	0.290
115	-0.184	-0.168	0.039	0.280
120	-0.179	-0.173	0.087	0.270
125	-0.174	-0.183	0.133	0.247
130	-0.169	-0.197	0.178	0.213
135	-0.165	-0.218	0.218	0.165
140	-0.163	-0.244	0.254	0.106
145	-0.163	-0.274	0.285	0.040
150	-0.165	-0.305	0.310	-0.031
155	-0.168	-0.337	0.330	-0.104
160	-0.172	-0.365	0.345	-0.176
165	-0.177	-0.386	0.356	-0.243
170	-0.181	-0.402	0.363	-0.306
175	-0.183	-0.419	0.367	-0.371
180	-0.184	-0.417	0.368	-0.417
185	-0.183	-0.371	0.367	-0.419
190	-0.181	-0.306	0.363	-0.402
195	-0.177	-0.243	0.356	-0.386
200	-0.172	-0.176	0.345	-0.365
205	-0.168	-0.104	0.330	-0.337
210	-0.165	-0.031	0.310	-0.305
215	-0.163	0.040	0.285	-0.274
220	-0.163	0.106	0.254	-0.244
225	-0.165	0.165	0.218	-0.218
230	-0.169	0.213	0.178	-0.197
235	-0.174	0.247	0.133	-0.183
240	-0.179	0.270	0.087	-0.173
245	-0.184	0.280	0.039	-0.168
250	-0.187	0.290	-0.008	-0.166
255	-0.186	0.315	-0.052	-0.167
260	-0.185	0.337	-0.096	-0.168
265	-0.191	0.341	-0.146	-0.169
270	-0.186	0.339	-0.186	-0.169
275	-0.146	0.341	-0.191	-0.169
280	-0.096	0.337	-0.185	-0.168
285	-0.052	0.315	-0.186	-0.167
290	-0.008	0.290	-0.187	-0.166
295	0.039	0.280	-0.184	-0.168
300	0.087	0.270	-0.179	-0.173
305	0.133	0.247	-0.174	-0.183
310	0.178	0.213	-0.169	-0.197
315	0.218	0.165	-0.165	-0.218
320	0.254	0.106	-0.163	-0.244
325	0.285	0.040	-0.163	-0.274
330	0.310	-0.031	-0.165	-0.305
335	0.330	-0.104	-0.168	-0.337
340	0.345	-0.176	-0.172	-0.365
345	0.356	-0.243	-0.177	-0.386
350	0.363	-0.306	-0.181	-0.402
355	0.367	-0.371	-0.183	-0.419

Tableau 47 Coefficients de pressions pour les 4 façades du 3^{ème} niveau du bâtiment en fonction de l'orientation du vent

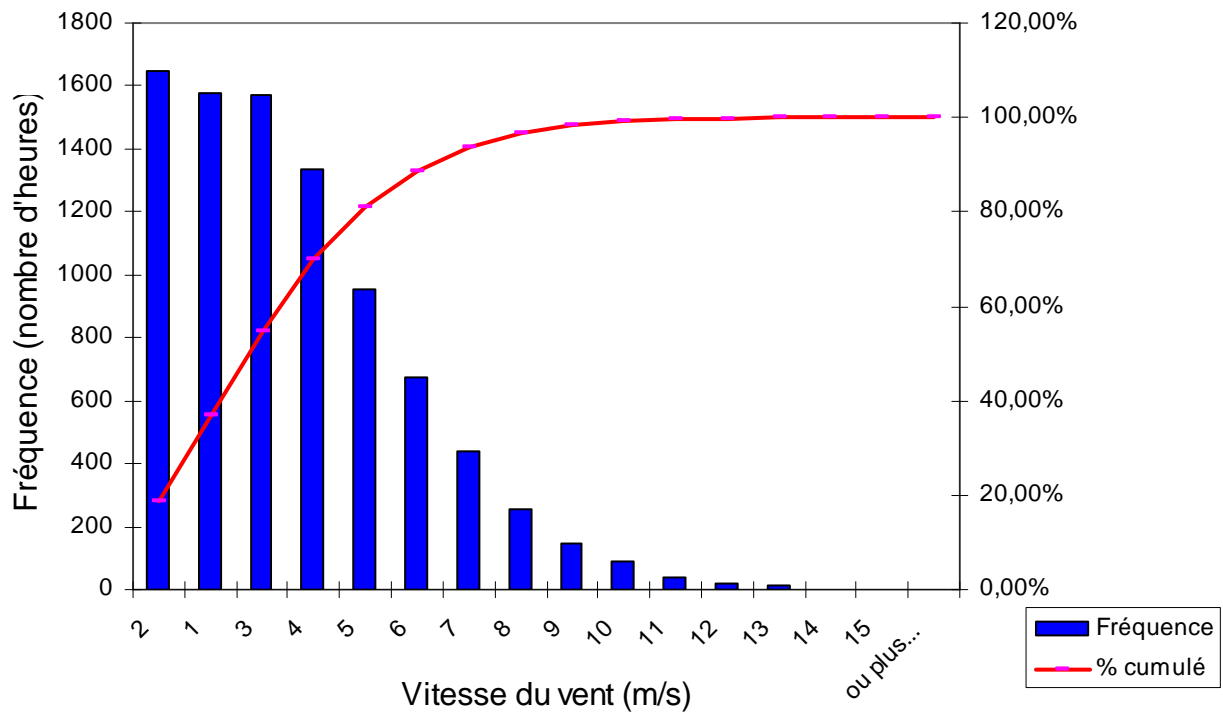


Figure 77 Fréquence et fréquence cumulée des vitesses de vent sur une année type à Uccle

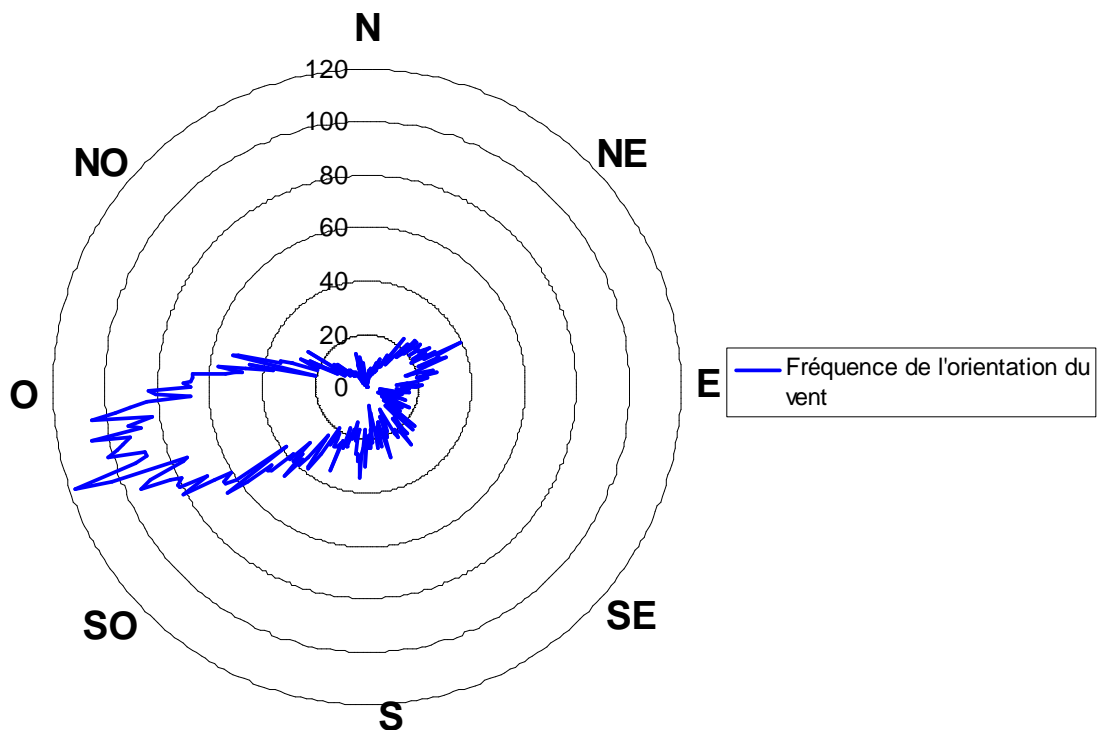


Figure 78 Fréquence de l'orientation du vent à Uccle

V-2-2-5) HYPOTHÈSES SUR LE RENOUVELLEMENT D'AIR

L'objectif de l'étude est d'apprécier l'influence des infiltrations d'air sur les besoins de chauffage du bâtiment pour plusieurs types de ventilation mécanique.

Les hypothèses sur les types de ventilation sont les suivantes :

- ✓ Ventilation simple flux : 0,5 vol/h tout le temps ;
- ✓ Ventilation simple flux hygroréglable : 0,5 vol/h quand le bâtiment est occupé, 33% de cette valeur (soit 0,165 vol/h) le reste du temps ;
- ✓ Ventilation double flux : 0,5 vol/h tout le temps avec une efficacité d'échangeur de 80%.

On fait aussi varier la perméabilité à l'air de l'enveloppe en considérant sept niveaux de perméabilité à l'air sous 4Pa :

- ✓ $0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$;
- ✓ $0,16 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, la cible de la maison passive;
- ✓ $0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, niveau BBC pour les maisons individuelles;
- ✓ $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, niveau BBC pour les logements collectifs ;
- ✓ $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, valeur de référence de la réglementation thermique (le bâtiment a été construit dans le cadre d'une démarche qualité) ;
- ✓ $1,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ valeur par défaut de la réglementation thermique qui est représentatives des logements neufs ;
- ✓ $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, soit une très faible étanchéité à l'air.

V-2-2-6) RÉSULTATS

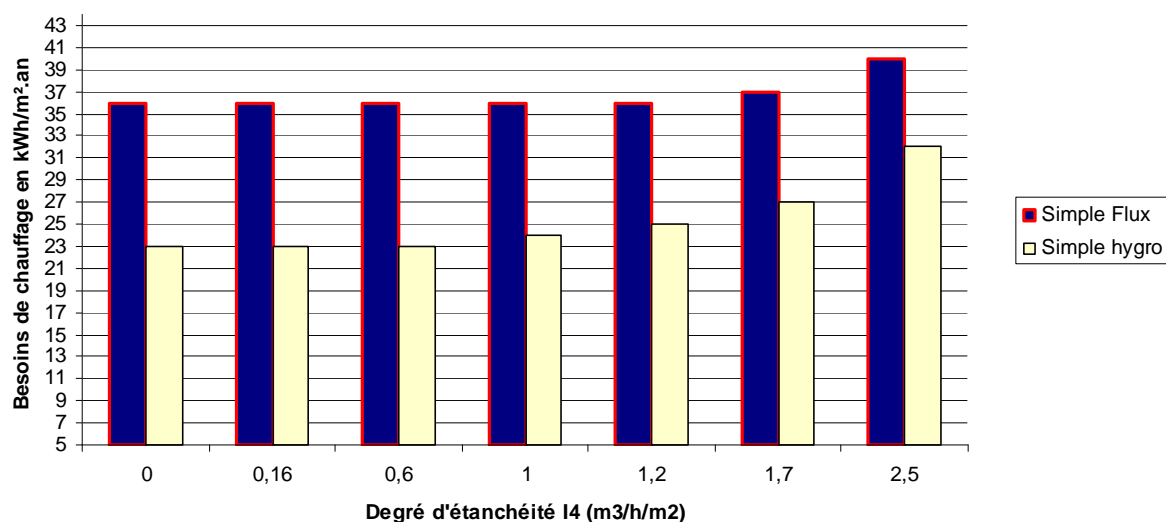


Figure 79 Influence de l'étanchéité à l'air sur les besoins de chauffage (cas de la ventilation simple flux et simple flux hygroréglable)

Le résultat des vingt-et-une simulations montre une grande disparité dans les besoins de chauffage suivant le degré de perméabilité à l'air et le système de ventilation choisi (cf. Figure 79 pour le cas simple flux et Figure 80 pour le cas double flux).

Dans le cas d'une ventilation mécanique simple flux, le niveau d'étanchéité a une faible influence, c'est en effet le débit de renouvellement qui prend la plupart du temps le dessus sur les phénomènes naturels de vent et tirage. On note cependant une différence de 1,7% entre les variantes $1,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ et $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ et une forte augmentation des besoins de chauffage dans le cas de bâtiment très peu étanches.

$I_4 (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$ sous 4 Pa	0	0,16	0,6	1	1,2	1,7	2,5
SF (kWh.m ⁻²)	36	36	36	36	36	37	40
Hygro (kWh.m ⁻²)	23	23	23	24	25	27	32
DF (kWh.m ⁻²)	14	15	17	19	20	23	27

Tableau 48 Besoins de chauffage annuels par m² pour l'ensemble du bâtiment en fonction de la ventilation et du niveau d'étanchéité

Dans le cas d'une ventilation simple flux hygroréglable, le bâtiment est plus sensible au vent et au tirage thermique, on constate donc des écarts plus importants entre les variantes à partir de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. On observe par exemple une différence de 14% entre les variantes $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ et $1,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$.

Enfin, dans le cas d'une ventilation double flux, l'étanchéité à l'air tient un rôle prépondérant sur la performance énergétique du bâtiment. Par exemple, on note une différence de 31% entre la variante présentant une étanchéité de type "maison passive" et celle présentant une étanchéité de type "BBC". L'écart de consommation entre le niveau BBC et le niveau standard $1,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ est lui de 20%.

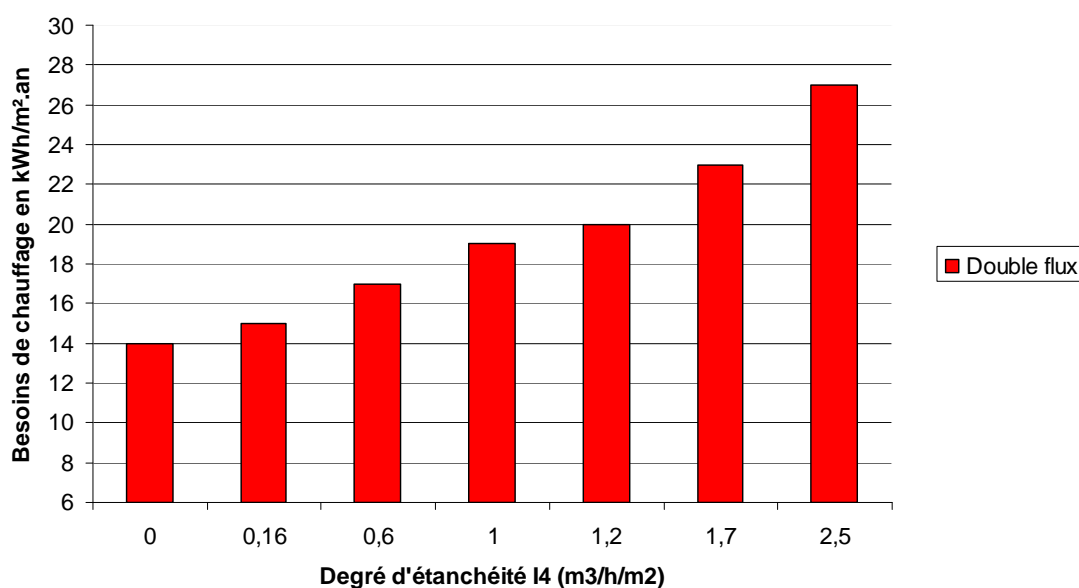


Figure 80 Influence de l'étanchéité à l'air sur les besoins de chauffage (cas de la ventilation double flux)

V-2-3) ANALYSE DE CYCLE DE VIE

V-2-3-1) HYPOTHÈSES

Fonctionnement général du bâtiment

Les hypothèses de calcul communes à toutes les variantes considérées pour l'ACV sont les suivantes :

- ✓ **Transport des occupants** : non pris en compte ;
- ✓ **Rendement du réseau d'eau** : 80% ;
- ✓ **Production belge d'électricité** : 56% nucléaire, 2% hydroélectrique, 21% gaz naturel et 21% charbon ;
- ✓ **Energie utilisée pour le chauffage et la production d'eau chaude** : gaz naturel ;
- ✓ **Production de déchets ménagers** : non pris en compte ;
- ✓ **Distance de transport des matériaux du site de production au chantier** : 50 km ;
- ✓ **Surplus de matériaux lors du chantier** : 5% ;
- ✓ **Distance site décharge pour les déchets de construction/rénovation/démolition (considérés comme inertes)** : 20km ;
- ✓ **Durée de vie des fenêtres** : 30 ans ;
- ✓ **Durée de vie des revêtements** : 15 ans ;
- ✓ **Durée de l'analyse** : 80 ans.

Dans la continuité de l'étude thermique, on conserve deux variantes qui présentent des différences au niveau de l'étanchéité à l'air :

- ✓ Variante **Base** : correspond à un bâtiment neuf moyen avec aucune attention particulière portée à l'étanchéité à l'air : $I_4 = 1,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ sous 4 Pa;
- ✓ Variante **Meilleures Pratiques** : correspond à un bâtiment où l'étanchéité a été travaillée pour atteindre la valeur de fuite de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ sous 4 Pa.

Production et consommation d'eau

On considère une consommation d'eau moyenne de 40 l d'ECS (Eau Chaude Sanitaire) et 100 l d'eau froide par habitant et par jour auxquelles on retranche 30% en raison de la présence de réducteurs de débits. Les valeurs de consommation retenues sont donc 28 l d'ECS et 70 l d'eau froide par habitant et par jour.

Travaux d'étanchéité

En ce qui concerne les travaux d'étanchéité, les hypothèses sont indiquées dans le Tableau 49 en se basant sur les données techniques fournies dans le cadre du projet PREBAT MININFIL. On fait des hypothèses sur les parois, les liaisons et les menuiseries. Les réseaux ne sont pour l'instant pas pris en compte par le logiciel.

Elément considéré	Unité	Composition
Liaison Mur/Plancher Bas	1m	1m joint mastic + 1m fond de joint polyéthylène
Liaison Mur/Plancher Haut	1m	1m joint mastic + 1m fond de joint polyéthylène
Menuiserie appui	1m	1m membrane polyester + 2m joint mastique + 2m joint mousse + 1m bande adhésive
Menuiserie linteau	1m	1m membrane polyester + 2m joint mastique + 2m joint mousse
Menuiserie tableau	1m	1m membrane polyester + 1m joint mastique + 1m joint mousse
Paroi courante	1m ²	1m ² enduit d'étanchéité ciment

Tableau 49 Hypothèse sur les travaux d'étanchéité

V-2-3-2) RÉSULTATS

Impacts générés par les travaux d'étanchéité

Le Tableau 50 présente les impacts générés les travaux d'étanchéité sur le bâtiment. Le contributeur le plus important est l'enduit (la Figure 81 illustre ce phénomène pour la contribution au réchauffement climatique et la consommation d'eau).

Indicateur	Unité	Construction	Rénovation	Démolition	Total
GWP100	GJ	4936,85	706,53	236,47	5879,85
acidification	m3	9,85	2,55	1,34	13,75
énergie	kg antimoine eq.	42,68	16,41	5,00	64,09
eau	t eq	48,76	5,72	4,35	58,83
déchets	dm3	0,49	0,17	24,86	25,52
ressources	t CO2	15,43	7,20	2,17	24,80
eutrophisation	kg SO2	1,29	0,31	0,29	1,90
O3-smog	kg PO4	0,43	0,24	0,05	0,72
écotoxicité	PDF *m ² *an	40,43	14,60	75,27	130,31
déchets rad.	DALY	0,04	0,01	0,00	0,05
santé humaine	kg C2H4	0,00	0,00	0,00	0,01
odeurs	Mm3	17,28	14,86	4,86	37,00

Tableau 50 Impact total généré par l'ensemble travaux d'étanchéité sur le cycle de vie

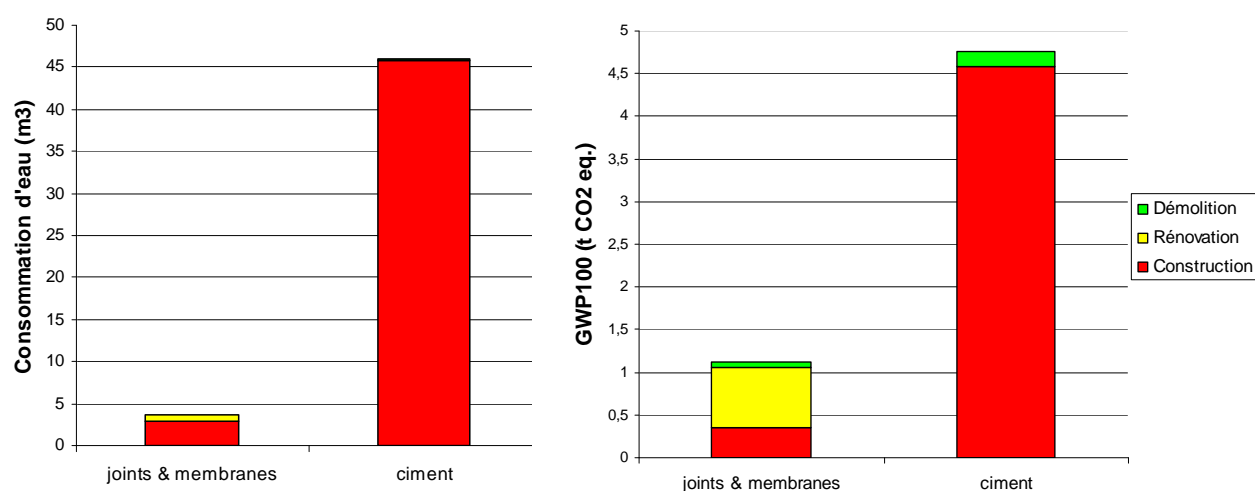


Figure 81 Comparaison entre le ciment et les autres produits d'étanchéité pour la consommation d'eau et les émissions de gaz à effet de serre

Impacts évités

A l'exception de la production de déchets supplémentaires générés à la démolition du bâtiment, les impacts sont tous globalement réduits sur le cycle de vie comme le montrent les tableaux ci-dessous.

Indicateur	Unité	Construction	Utilisation	Rénovation	Démolition	Total
énergie	GJ	13130,40	60850,03	36936,85	1119,95	112037,23
eau	m3	11320,30	535761,31	19160,13	750,00	566991,75
ressources	kg antimoine eq.	5460,63	28622,18	16384,67	404,41	50871,89
déchets	t eq	516,77	800,08	930,52	3981,55	6228,91
déchets rad.	dm3	8,86	12,88	23,27	0,23	45,23
GWP100	t CO2	997,03	3609,79	2119,16	40,11	6766,08
acidification	kg SO2	5350,27	5357,71	17835,66	386,56	28930,19
eutrophisation	kg PO4	666,87	7884,85	1429,53	106,93	10088,18
écotoxicité	PDF*m²*an	43096,13	31153,61	87490,32	1211,22	162951,28
santé humaine	DALY	1,09	1,62	3,17	0,07	5,94
O3-smog	kg C2H4	212,99	446,69	669,70	7,77	1337,15
odeurs	Mm3	6925,46	88437,17	24490,45	918,15	120771,22

Tableau 51 Impacts engendrés par la variante I4 = 1 m3.h-1.m-2

Indicateur	Unité	Construction	Utilisation	Rénovation	Démolition	Total
énergie	GJ	13087,72	67236,70	36920,44	1114,95	118359,81
eau	m3	11271,54	535917,21	19154,41	745,66	567088,82
ressources	kg antimoine eq.	5445,21	31715,60	16377,46	402,24	53940,51
déchets	t eq	516,28	812,61	930,34	3956,69	6215,92
déchets rad.	dm3	8,82	13,26	23,26	0,23	45,57
GWP100	t CO2	992,09	3983,89	2118,45	39,87	7134,30
acidification	kg SO2	5340,42	5685,96	17833,10	385,22	29244,70
eutrophisation	kg PO4	665,58	7912,90	1429,22	106,63	10114,33
écotoxicité	PDF*m²*an	43055,70	31978,54	87475,71	1135,95	163645,90
santé humaine	DALY	1,09	1,73	3,17	0,06	6,05
O3-smog	kg C2H4	212,56	486,95	669,46	7,72	1376,70
odeurs	Mm3	6908,18	98368,66	24475,58	913,29	130665,72

Tableau 52 Impacts engendrés par la variante I4 = 1,7 m3.h-1.m-2

Indicateur	Unité	Ecart	Ecart relatif
énergie	GJ	-6322,59	-5,34%
eau	m3	-97,07	-0,02%
ressources	kg antimoine eq.	-3068,62	-5,69%
déchets	t eq	12,99	0,21%
déchets rad.	dm3	-0,34	-0,74%
GWP100	t CO2	-368,21	-5,16%
acidification	kg SO2	-314,50	-1,08%
eutrophisation	kg PO4	-26,15	-0,26%
écotoxicité	PDF*m²*an	-694,62	-0,42%
santé humaine	DALY	-0,11	-1,78%
O3-smog	kg C2H4	-39,55	-2,87%
odeurs	Mm3	-9894,49	-7,57%

Tableau 53 Ecart absolu et relatif entre les deux variantes

Bilan des impacts

La Figure 82 montre les impacts engendrés (impacts positifs) et les impacts évités (négatifs) sur les différentes phases du cycle de vie du bâtiment.

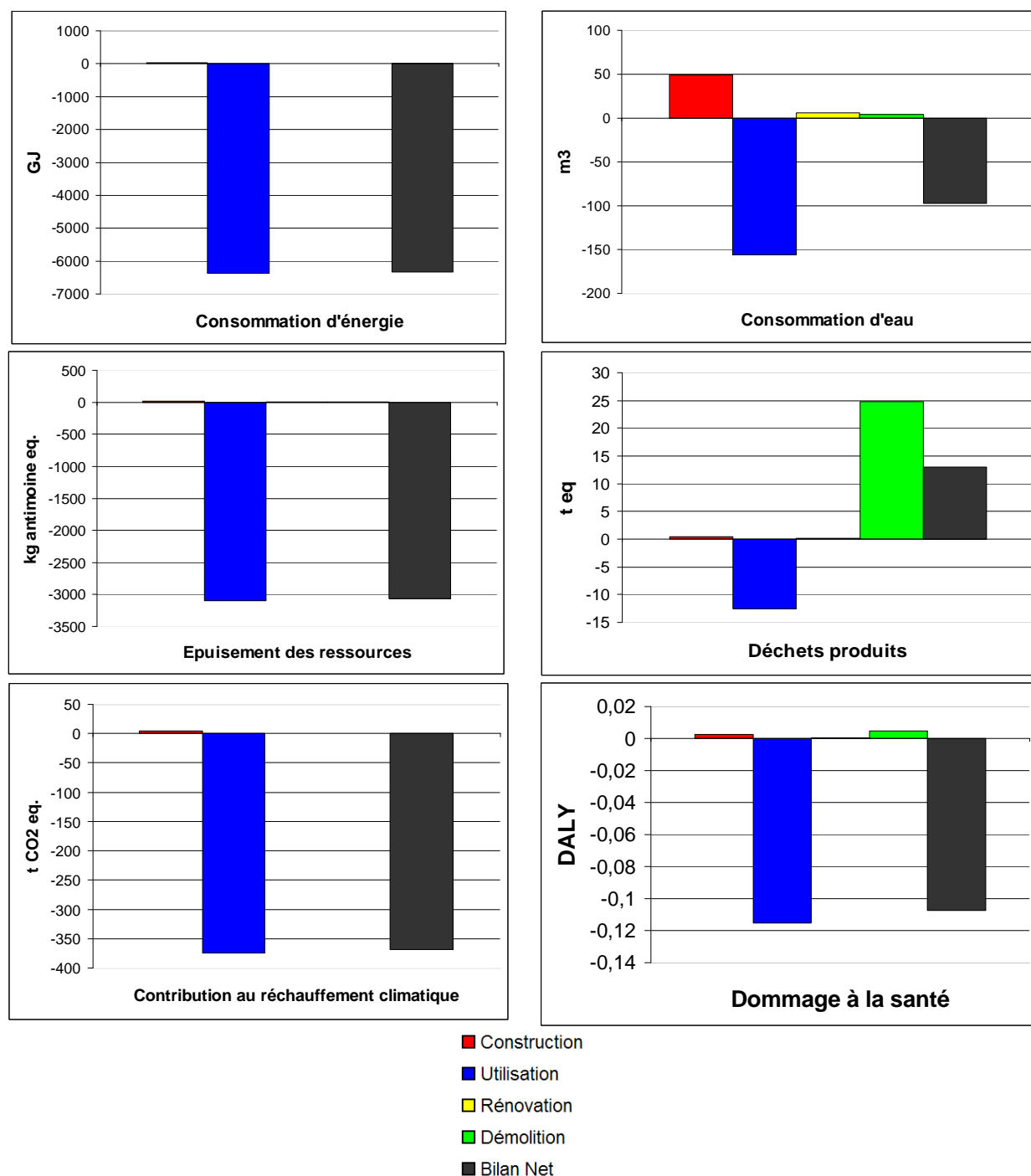


Figure 82 Bilan environnemental pour six impacts

Conclusion

L'analyse de cycle de vie du bâtiment pour deux niveaux de perméabilité à l'air a permis de montrer la pertinence environnementale d'une telle démarche.

L'écart d'impact entre les deux variantes représente la quantification environnementale d'une démarche de qualité de mise en œuvre du bâtiment. Tant sur le point technique (les techniques qui ont été étudiées) que sur un plan organisationnel sur le chantier (conception des points de détails propres au projet, articulation des différents corps de métiers sur le chantier, etc.).

La problématique de l'étanchéité à l'air permet donc à l'entreprise qui assemble le bâtiment de prendre une partie intégrante à son optimisation environnementale.

Par exemple, sur ce projet, une démarche de qualité de la mise en œuvre permettant d'atteindre $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ au lieu de $1,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ entraîne une économie annuelle de $1 \text{ kgCO}_2\text{eq} \cdot \text{m}^{-2}$ à autres caractéristiques thermiques égales.

V-3) CONCLUSIONS

Le modèle utilisé dans ces études de cas permet une meilleure prise en compte de l'étanchéité à l'air dans la conception énergétique d'un projet. On voit d'ailleurs que, même pour un bâtiment très compact comme EFFIBAT, ce paramètre peut avoir une influence importante sur l'efficacité globale de la ventilation et donc sur les besoins de chauffage du bâtiment.

Ensuite, il a permis d'étudier la problématique du confort d'été, d'une part en étudiant les besoins de climatisation de bureaux pour lesquels ont adopté une technique de free-cooling par surventilation nocturne. D'autre part il a permis d'évaluer avec plus de précision l'évolution des débits d'air et donc de la température en été dans les logements.

Enfin, chaîné avec un outil d'ACV, il a permis de montrer l'intérêt environnemental de la mise en place d'une démarche d'étanchéité à l'air des bâtiments.

CHAPITRE VI

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

VI-1) CONCLUSIONS

Le travail effectué s'intègre dans une démarche de modélisation orientée vers l'aide à la conception des bâtiments. Les choix effectués visent à rechercher un compromis pertinent entre le niveau de finesse de modélisation et la convivialité d'utilisation, rendant le modèle accessible et adapté à un grand nombre d'acteurs de l'industrie du bâtiment.

L'outil d'aide à la conception développé permet en effet de prendre en compte de nouveaux phénomènes dans l'étude énergétique du bâtiment avec un effort de saisie supplémentaire minimale : degré de perméabilité à l'air et éventuellement des coefficients de pression spécifiquement calculés pour le bâtiment par des outils annexes.

Les résultats proposés dans le chapitre V montrent son intérêt. Il permet en effet de traiter des points cruciaux pour les besoins de chauffage du bâtiment comme pour le confort d'été. Par exemple, dans la deuxième étude de cas, on a pu voir que les besoins pouvaient augmenter de 20% dans le cas d'une ventilation double flux avec récupération de chaleur si le bâtiment passe de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2$ à $1,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2$, ce qui est fréquent si aucune préoccupation n'est prise sur le chantier. Le second peut être analysé plus finement par des scénarii d'ouverture à travers l'enveloppe ; les résultats obtenus permettent alors la définition de préconisations pour les concepteurs mais aussi pour les occupants.

Enfin, l'insertion de l'outil dans une étude d'éco-conception a permis de montrer le bien fondé environnemental de la mise en œuvre d'une démarche d'étanchéité à l'air du bâtiment. Cette dernière s'appuie en effet en grande partie sur une conception précise des détails de construction, une organisation de chantier et enfin des travaux d'étanchéité dont les impacts environnementaux ont été évalués. Une telle démarche appliquée par les acteurs de la conception à la construction devient donc valorisable d'un point de vue environnemental.

VI-2) PERSPECTIVES

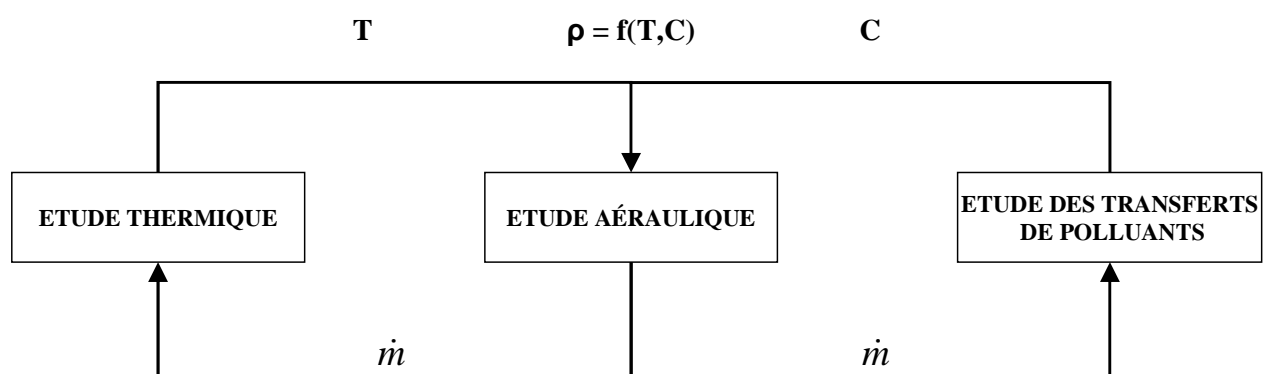


Figure 83 Principe du couplage entre modèles thermique, aéraulique et de transferts de polluants, pour chaque zone, la température et la concentration en polluants servent de données d'entrée au modèle aéraulique

Le modèle aéraulique développé dans le cadre de ce travail de thèse repose sur la détermination de différences de pression liées à des phénomènes naturels. Le processus de résolution de ce problème reste le même, quel que soit le type de connexion considérée.

A la manière des modules complémentaires du modèle thermique, il est donc possible d'intégrer le fruit d'autres travaux de recherche et de développer une bibliothèque de composants supplémentaires à ceux qui existent aujourd'hui. On pense par exemple à des éléments spécifiques à la ventilation naturelle comme des cheminées de ventilation ou la modélisation détaillée des réseaux de ventilation.

Ensuite, le couplage thermo-aéraulique effectué ouvre la voie à la modélisation du transport de polluants dans l'habitat. Un troisième modèle pourra donc être développé et couplé à son tour (cf. Figure 83). Il permettra par exemple d'évaluer le transport d'humidité et de COV à l'intérieur du bâtiment et donc d'affiner des stratégies de ventilation liées à ces deux paramètres.

Enfin, comme on l'a vu au chapitre II, il reste possible de discrétiser chaque zone du bâtiment de façon macroscopique (modèles zonaux) ou microscopique (avec les outils CFD) pour étudier plus finement les ambiances. Une partie des données d'entrées de ces modèles pourront alors être fournies par le modèle thermo-aéraulique exposé dans ces pages.

En tirant parti de mesures comme le test de la porte soufflante pour évaluer les infiltrations d'air sur une saison de chauffe, le modèle développé ici permet aux entreprises de construction de progresser vers la garantie de performances. Les architectes pourront également mieux cerner le potentiel de rafraîchissement passif apporté par la ventilation naturelle. L'outil constitue ainsi une étape vers une meilleure compréhension des phénomènes thermo-aérauliques, en attendant une prochaine génération intégrant par exemple des modèles intermédiaires entre les modèles zonaux et les codes de champs.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADALBERTH K., “Airtight Buildings – A Practical Guide”, in proceedings: Ventilation and cooling, 18th Air Infiltration and Ventilation Centre Conference, Athens, Greece, September 23-26, **1997**.

ALLARD F., “Natural ventilation of building, a design handbook”, London, James & James Ltd, 356p, **1998**.

ASHRAE, “Handbook of fundamentals”, American Society of Heating Refrigerating and Air conditioning Engineers, **2005**.

AXLEY J., “Residential passive ventilation systems : Evaluation and design”, Technical Note n° 54, Air Infiltration and Ventilation Center, Coventry, 158 p, **2001**.

BAKER P., **SHARPLES S.**, **WARD I.**, “Air flow through Cracks”, Building and Environnement, 22 (4), pp 293-304, **1987**.

BARHOUN H., “Influence des transferts aérauliques dans les parois sur leurs performances thermiques”, Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, **2006**.

BLOMSTERBERG A., **CARLSSON T.**, **SVENSSON C.**, **KRONVALL J.**, “Air flows in dwellings – simulations and measurements”, Energy and Buildings, 30, pp 87-95, **1999**.

BOZONNET E., “Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments, cas de la rue canyon”, Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, La Rochelle, France, **2005**.

BOUIA H., **DALICIEUX P.**, “Simplified modelling of air movements inside dwelling room”, Proceedings of the Building Simulation’91 Conference, Nice, France, pp.106-110, **1991**.

BOJIC M., **KOSTIC S.**, “Application of COMIS software for ventilation study in typical building in Serbia”, Building and Environment, 41, pp.12-20, **2006**.

BREESCH H., **BOSSAER A.**, **JANSSENS A.**, “Passive cooling in a low energy office building”, Solar Energy, 79, pp.682-696, **2005**.

BREESCH H., **JANSSENS A.**, “Uncertainty and sensitivity analysis to evaluate natural night ventilation design in an office building”, AIVC 26th conference - Brussels, Belgium, 21-23 September - pp 3-8, **2005**.

CARRIE R., **JOBERT R.**, **FOURNIER M.**, **VAN ELSLANDE H.**, “Perméabilité à l’air de l’enveloppe des bâtiments, généralités et sensibilisation”, CETE de Lyon, L’Isle d’Abeau, 41 p, **2006**.

CHAN W.R., **PRICE P.N.**, **SOHN M.D.**, **GADGIL A.J.**, “Analysis of U.S. residential air leakage database”, LBNL-53367, Laurence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA, **2003**.

DORER V., **TANNER C.**, **WEBER A.**, “Airtightness of buildings”, Ventilation Information Paper n° 8, Air Infiltration and Ventilation Centre, Brussels, 8 p, **2004**.

DUBRUL C., “Inhabitant behaviour with respect to ventilation – A summary report of IEA annex VIII, Technical Note n° 23, Air Infiltration and Ventilation Center, Berkshire, 78 p, **1988**.

EFFINERGIE, “Réussir un projet de Bâtiment Basse Consommation”, guide à destination des professionnels du bâtiment, **2008**.

FEUSTEL H.E., “COMIS – An international multizone air-flow and contaminant transport model, Energy and Buildings volume 30, p 3-18, **1999**.

FEUSTEL H.E., **DIERIS J.**, “A survey of airflow models for multizone structures”, Energy and Buildings, 30, pp.3-18, **1992**.

FEUSTEL H.E., **RAYNOR-HOOSSEN A.**, “Fundamental of the multizone air flow model – COMIS”, Technical Note n° 29, Air Infiltration and Ventilation Center, Coventry, 114 p, **1990**.

FEUSTEL H.E., **SMITH B.**, **DORER V.**, **HAAS A.**, **WEBER A.**, “COMIS 3.2 – User Guide”, Laboratoire federal d’essai des matériaux et de recherché, EMPA, Lausanne, novembre, **2005**.

FFB, “RT 2000 – Perméabilité à l’air des bâtiments en maçonnerie ou en béton”, SEBTP, Paris, **2003**.

FILFI S., **MARCHIO D.**, **FLEURY E.**, **MILLET J.R.**, “La perméabilité des enveloppes dans les calculs de consommation d’énergie des bâtiments”, conférence IBPSA France 2006, **2006**.

FRISCHKNECHT R. ET AL., “Overview and Methodology”, Final report ecoinvent v2.0 No. 1, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf, **2007**.

GEROS V., **SANTAMOURIS M.**, **TSANGRASSOULIS A.**, **GUARRACINO G.**, “Experimental evaluation of night ventilation phenomena”, Energy & Buildings, 29, pp.141-154, **1999**.

GOEDKOOP M. et **SPRIENSMA R.**, “The Eco-indicator 99 : A damage oriented method for life cycle impact assessment”, PRé Consultants, Amersfoort, Pays Bas, 142 p, **2000**.

GROSSO M., **MARINO D.**, **PARISI E.**, “A wind pressure distribution calculation program for multizone airflow models”, conférence IBPSA 1995, **1995**.

GUIAVARCH A., “Etude de l’amélioration de la qualité environnementale du bâtiment par intégration de composants solaires”, thèse de doctorat. Université de Cergy-Pontoise. 312 p, 2003.

GUINÉE J. B., (final editor), **GORRÉE M.**, **HEIJUNGS R.**, **HUPPES G.**, **KLEIJN R.**, de **KONING A.**, **VAN OERS L.**, **WEGENER SLEESWIJK A.**, **SUH S.**, **UDO DE HAES H. A.**, **DE BRUIJN H.**, **VAN DUIN R.**, **HUIJBREGTS M. A. J.**, **LINDEIJER E.**, **ROORDA A. A. H.**, **WEIDEMA B. P.**, “Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards”, Ministry of Housing, Spatial

Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, Pays Bas, 704 p, **2001**.

GOULDING J.R., LEWIS J.O., STEEMERS T.C., “Energy in architecture, the European Passive Solar Handbook”, 339 p, **1993**.

HAGHIGAT F., “Development of a procedure to evaluate the air leakage distribution from fan pressurization test – Validation of three airflow models”, CIB W78’s 20th International Conference on Construction IT, Waiheke Island, New Zealand, pp.137-145, **2003**.

HAGHIGAT F., LIN Y., MEGRI A.C., “Developpement and validation of a zonal model – POMA, Building and Environment”, 36 (9), pp.1039-1047, **2001**.

HEIJMANS N., WOUTERS P., “Impact of the uncertainties on wind pressures on the prediction of thermal comfort performances”, Technical Report, Annex 35 : HybVent, Energy Conservation in Buildings and Community Systems, International Energy Agency, **2002**.

HOUGHTON J.T., DING Y., GRIGGS D.J., NOGGER M., VAN DER LINDEN P.J., DAI X., MASKEL K., JOHNSON C.A., Intergovernmental panel on Climate Change (IPCC), Climate change 2001 : the scientific basis, Cambridge University Press, 881 p, **2001**.

INARD C., BOUIA H., DALICIEUX P., “Prediction of air temperature distribution in buildings with a zonal model”, Energy and Buildings, 24, pp.125-132, **1996**.

HENSEN J.L.M., “On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system”, Thèse de doctorat, Eindhoven University of Technology, ISBN 90-386-0081-X, **1991**.

HENSEN J.L.M., “On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system”, AIVC 16th conference - Palmsprings, USA, September - pp 253-262, **1995**.

INARD C., DEPECKER P., ROUX J.J., “Un modèle simplifié pour la prediction du champ de température dans les bâtiments”, Revue Générale de Thermique, 36, pp.113-123, **1997A**.

INARD C., MESLEM A., DEPECKER P., BARLES P., “Structure moyenne et analyse intégrale du panache thermique des convecteurs électriques”, Revue Générale de Thermique, 36, pp.495-509, **1997B**.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO), “‘Environnemental Management – Life Cycle Assessment – Principles and framework’”, European standard EN ISO 14040, Genève, 11 p, **1997**.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO), “‘Environnemental Management – Life Cycle Assessment – Goal and scope definition and Life Cycle Inventory Analysis’”, European standard EN ISO 14041, Genève, 28 p, **1998**.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO), “Environnemental Management – Life Cycle Assessment – Life Cycle Impact Assessment”, European standard EN ISO 14042, Genève, 16 p, **2000A**.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO), “Environnemental Management – Life Cycle Assessment – Life Cycle Interpretation”, European standard EN ISO 14043, Genève, 18 p, **2000B**.

JRELJIRY D., **HUSAUNNDEE A.**, **INARD C.**, “Numerical study of a hybrid ventilation system for single family houses”, *Solar Energy*, 81, pp. 227-239, **2007**.

KHOUKHI M., **YOSHINO H.**, **LIU J.**, “The effect of the wind speed velocity on the stack pressure in medium-rise buildings in cold region of China”, *Building and Environnement*, 42, pp 1081-1088, **2007**.

KNOLL B., **PHAFF J.**, de **GIDS W.**, “Pressure simulation program”, update of a publication for the 16th AIVC Conference, TNO Building and Construction Research, Delft, The Netherlands, **1997**.

KOANAKIS C., “Combined thermal and natural ventilation for long-term energy assessment : validation with experimental measurements”, *Energy and Building*, 37, pp 311-323, **2005**.

KULA H., **SHARPLES S.**, “Air flow through smooth and rough cracks”, AIVC 15th conference - Buxton, Great Britain, 27-30 September, **1994**.

LEFEBVRE G., “Analyse et réduction modale d’un modèle de comportement thermique de bâtiment”, Thèse de Doctorat, Université de Paris VI, France, **1987**.

LIDDAMENT M. W., “A guide to energy efficient ventilation”, Air Infiltration and Ventilation Center, Coventry, 274 p, **1996**.

MEGRI A.C., **SNYDER M.**, **MUSY M.**, “Building zonal thermal and airflow modelling – A review”, *International Journal of Ventilation* volume 4, pp.177-188, **2005**.

MORA L., “Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différent niveaux de finesse au sein d’un environnement orienté objet”, Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, La Rochelle, France, **2003**.

MUSY M., **WURTZ E.**, **WINKELMANN F.**, **ALLARD F.**, “Generation of a zonal model to simulate natural convection in a room with a radiative/convective heater”, *Building and Environnement*, 36, pp.589-596, **2001**.

NATIONS UNIES, “Convétion-cadre des nations unies sur les changements climatiques”, **1992**.

NF EN 12831 “Méthode de calcul des déperditions calorifiques de base”, Agence Française de NORmalisation, **2004**.

NF EN 13829, “Détermination de la perméabilité à l’air des bâtiments”, Agence Française de NORmalisation, **2001**.

NF EN 15242, “Méthodes de calcul pour la détermination des débits d'air dans les bâtiments y compris l'infiltration”, Agence Française de NORmalisation, **2007**.

ORME M., **LIDDAMENT M.**, **WILSON A.**, “An analysis and data summary of the AIVC’s numerical database”, Technical Note n° 44, Air Infiltration and Ventilation Center, Coventry, 108 p, **1994**.

ORME M., “Applicable models for air infiltration and ventilation calculations”, Technical Note n° 51, Air Infiltration and Ventilation Center, Coventry, 66 p, **1999**.

PELLETRET R., **ALLARD F.**, **HAGHIGHAT F.**, **LIEBECQ G.**, **VAN DER MAAS J.**, “Modelling of large openings”, 12th Air Infiltration and Ventilation Center Conference, Ottawa, Canada, pp.99-109, September 24-27, **1991**.

PERSILY A., **CRUM J.**, **NABINGER S.**, **LUBLINER M.**, “Ventilation characterization of a new manufactured house”, AIVC 24th Conference & BETEC conference - Ventilation, Humidity control and energy Proceedings, Washington DC, October 14, pp. 295-300, **2003**.

PERSILY A., **IVY E.**, “Input data for multizone airflow and IAQ analysis”, NISTIR 6585, National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, 33 p, **2001**.

PEUPORTIER B., **BLANC SOMMEREUX I.**, “Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings”, International Journal of Solar Energy, vol. 8 pp109-120, **1990**.

PEUPORTIER B., **BLANC SOMMEREUX I.**, “COMFIE, passive solar design tool for multizone buildings : Manuel des utilisateurs version 3.3”, Centre d’énergétique, Ecole des Mines de Paris, 92 p, **1994**.

PEUPORTIER B., “Banc d’essais de logiciels de simulation thermique”, Conférence IBPSA, **2005**.

POLSTER B., “Contribution à l’étude d’impact environnemental des bâtiments par analyse de cycle de vie”, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 270p, **1995**.

POPE, “loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique”. Journal Officiel de la République Française n°163, 14 juillet, **2005**.

POPOVICI E., “Contribution à l’analyse de cycle de vie des quartiers”, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 209 p, **2006**.

PREBAT, “Comparaison internationale Bâtiment et énergie :Rapport final”, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'énergie/Plan Urbanisme Construction Architecture/Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, **2007**.

REGARD M., “Contribution à l’étude des mouvements d’air dans le bâtiment à l’aide d’un code de champ : application à la ventilation naturelle d’un local par une ou deux grandes ouvertures”, Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, **1996**.

REGLEMENTATION THERMIQUE 2005, Arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments, Ministère de l’Emploi de la Cohésion Sociale et du Logement, **2006**.

SALOMON T., **MIKOLASEK R.**, **PEUPORTIER B.**, “Outil de simulation thermique du bâtiment, COMFIE”, journée thématique SFT-IBPSA, **2005**.

SHERMAN M.H., **GRIMSRUD D.T.**, “Measurement of infiltration using fan pressurization and weather data”, LBL-10852, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA, USA, **1980**.

SHERMAN M.H., **MATSON N.E.**, “Air tightness of new U.S. houses : A preliminary report”, LBNL-48671, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA, **2002**.

SHERMAN M.H., **CHAN R.**, “Building airtightness : research and practice”, LBNL-53356, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA, **2004**.

SIDLER O., “Synthèse des campagnes de mesures sur les usages électriques spécifiques du secteur résidentiel”, projet européen SAVE, Agréments No 4.1031/93.58 et 4.1031/5/94-093. Commission des communautés européennes – ADEME, **1997**.

SIDLER O., “Logements à faibles besoins en énergie, guide de recommandation et d’aide à la conception”, région Rhone Alpes, ODH 26, ADEME, conseil général de Savoie, **2000**.

THIERS S., Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive , thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 252 p, **2008**.

TROCMÉ M., **PEUPORTIER B.**, “Analyse de cycle de vie du bâtiment”, revue J3A, volume 7, 22 avril, **2008**.

VOELTZEL A., **CARRIÉ F.R.**, **GUARRACINO G.**, “Thermal and ventilation modelling of large highly-glazed spaces”, Energy and Buildings, 33 (2), 121-132, **2001**.

WALKER I., **WILSON D.**, **SHERMAN M.**, “A comparison of the power law to quadratic formulations for air infiltration calculations”, Energy and Buildings, 27 (3), **1997**.

WALTON G.N., “AIRNET – A computer program for building airflow network modelling”, National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, 77p, **1989**.

WALTON G.N., **DOLS W.S.**, “CONTAM 2.4 user guide and program documentation”, National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, 234 p, **2006**.

WEBER A., **KOSCHENZ M.**, **DORER V.**, **HILLER M.**, **HOLST S.**, “TRNFLOW, a new tool for the modelling of heat, air and pollutant transport in buildings within TRNSYS”, IBPSA 8th Conference – Eindhoven, Netherlands, 11-14 August, **2003**.

WILLEMS L., JANSSENS A., “Performance prediction of dwelling ventilation with self-regulating air inlets”, AIVC 26th conference - Brussels, Belgium, 21-23 September - pp 197-202, **2005**.

WONG N., CHIN H., “An evaluation exercise of a wind pressure distribution model”, Energy and Buildings, 34 , 291-309, **2002**

WURTZ E., MORA L., INARD C., “An equation-based simulation environment to investigate fast building simulation”, Building and Environnement, 41, pp.1571-1583, **2006**.

WURTZ E., MUSY M., ALLARD F., “Modélisation d’un panache émetteur de chaleur pour le logiciel de simulation énergétique des bâtiments SPARK”, International Journal of Thermal Sciences, 39, pp.433-441, **2000**.

WURTZ E., NATAF J.M., WINKELMANN F., “Two- and three-dimensional natural and mixed convection simulation using modular zonal model in buildings”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 42, pp.923-940, **1999**.